

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Hodnocení drsnosti povrchu po
vysokorychlostním obrábění**

**Evaluation of Surface Roughness after
High Speed Machining**

Student:

Dalibor Jurok

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.

Ostrava 2011

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění a montáže

Zadání bakalářské práce

Student: **Dalibor Jurok**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2303R002 Strojírenská technologie**
Specializace: **70 Strojírenská technologie**
Téma: **Hodnocení drsnosti povrchu po vysokorychlostním obrábění**
Evaluation of Surface Roughness after High Speed Machining

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do vysokorychlostního obrábění.
2. Problematika hodnocení drsnosti povrchu.
3. Návrh experimentální části práce.
4. Provedení experimentu a měření drsnosti povrchu.
5. Zhodnocení a shrnutí přínosů pro praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007, s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] ERDL, BERT P. *High-speed machinig*. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineering, 2003. ISBN 0-87263-649-6.
- [5] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007, s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [6] ZELENÝ, J. Vysokorychlostní obrábění. *MM průmyslové spektrum*. 2000. ISSN 1212-2572.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 10.5. 2011

Jiřík Dalibor

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že se s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 10. 5. 2011

Jurok Dalibor

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Dalibor Jurok

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Janovice č. 439, 739 11

okr. Frýdek - Místek

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JUOK, D. *Hodnocení drsnosti povrchu po vysokorychlostním obrábění : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011, 50 s. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Mgr. Jana Petru, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá hodnocením drsnosti povrchu po vysokorychlostním obrábění. Teoretická část, se zabývá problematikou vysokorychlostního obrábění a drsnosti povrchu, spolu s uvedeným návrhem experimentu. V experimentální části jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty drsnosti povrchu, v závislosti na navržených parametrech a použitých řezných nástrojích. Drsnost, byla měřena na vzorcích oceli 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128 a Bolzanova ocel ASP 2023 (ENHS 6-5-3), až po opracování na stroji frézovacího centra DMU 60 MonoBLOCK®. V závěru je zhodnocena kvalita obrobeného povrchu po vysokorychlostním obrábění, při nejvhodnějších parametrech použitých nástrojů po obrábění použitých materiálů oceli.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

JUOK, D. *Information System Creation : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2011, 50 p. Thesis head: Jana Petru, Ph.D., multi MSc. M.A.

This bachelor thesis evaluates the roughness of the surface after high-speed machining. The theoretical part deals with high-speed machining and surface roughness together with this proposed experiment. The experimental part shows the measured and calculated values of surface roughness depending on the proposed parameters and used cutting tools. Roughness was measured on samples of steel 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128 and Bolzano steel ASP 2023 (ENHS 6-5-3) till after processing on a milling machine of the milling center DMU 60 MonoBLOCK®. In conclusion, the quality of machined surface is evaluated after high-speed machining with the most appropriate parameters of used tools and after machining of the used steel grades.

OBSAH

OBSAH	1
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	3
1. ÚVOD DO VYSOKORYCHLOSTNÍHO OBRÁBĚNÍ.....	6
1.1 HSC – vysokorychlostní obrábění (High speed cutting)	6
1.2 Obrábění nasucho (Dry machining).....	7
1.2.1 Výhody obrábění nasucho	7
1.3 Obrábění s použitím přivedené řezné kapaliny (Wet machining)	8
1.4 Řezný proces.....	8
1.5 Mechanismus tvorby třísky u klasického obrábění.....	9
1.6 Mechanismus tvorby třísky při HSC obrábění	10
1.7 Porovnání konvekčních řezných procesů a procesů při HSC	10
1.8 Aplikace vysokorychlostního obrábění	12
1.8.1 Použití HSC technologie.....	12
1.8.2 Specifické použití HSC.....	13
1.8.3 Příklady použití HSC v praxi.....	13
1.9 Frézování	15
2. PROBLEMATIKA HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU	16
2.1 Struktura povrchu	16
2.2 Drsnost povrchu	16
2.3 Princip měření drsnosti povrchů	17
2.4 Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu	18
3. NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI PRÁCE.....	21
3.1 Použitý stroj	21
3.2 Použité nástroje.....	22
3.3 Materiálové vzorky	24
3.4 Řezné podmínky pro daný experiment	26
3.5 Měřicí přístroj pro měření parametrů drsnosti povrchu.....	27

4. PROVEDENÍ EXPERIMENTU A MĚŘENÍ DRNOSTI POVRCHU.....	29
4.1 Naměřené hodnoty a vyhodnocení výsledku drsnosti povrchu	31
4.2 Testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou.....	34
4.3 Nejistoty měření.....	35
4.4 Vyhodnocení měření drsnosti povrchu	39
4.4.1 Hodnoty parametru drsnosti povrchu – 3 břit. nástroj, ocel 15 128, osa x.....	39
4.4.2 Hodnoty parametru drsnosti povrchu – 3 břit. nástroj, ocel 15 128, osa y	41
4.4.3 Hodnoty parametru drsnosti povrchu – 3 břit. nástroj, ocel ASP 2023 osa x.....	43
4.4.4 Hodnoty parametru drsnosti povrchu – 3 břit. nástroj, ocel ASP 2023 osa y.....	44
5. ZHODNOCENÍ A SHRUTÍ PŘÍNOSŮ PRO PRAXI	47
POUŽITÁ LITERATURA.....	48
SEZNAM PŘÍLOH.....	50

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A5	tažnost oceli [%]
AP ₁ MAX	maximální využitelná délka řezné části nástroje [mm]
D	průměr stopy nástroje [mm]
D ₁	řezný průměr nástroje [mm]
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
HPM	High Production Machining – vysokoproduktivní obrábění [-]
HRC	tvrdost podle Rockwell [-]
HSC	High Speed Cutting – vysokorychlostní obrábění
L	celková délka nástroje [mm]
LS	použitelná délka stopky nástroje [mm]
NC	Numeric Kontrol – počítačově řízeno [-]
PVD	physical vapour deposition – fyzikálně nanášené povlaky [-]
Z _{1MAX}	max. odchylka j-tého zdroje nejistoty vlivu opěrné patky drsnoměru [μm]
Z _P	nejvyšší výstupek profilu [μm]
ZU	počet břitů
Z _v	nejnižší výstupek profilu [μm]
Z _(x)	výška profilu v libovolné poloze x [μm]
a _p	hloubka řezu [mm]
f _n	posuv na otáčku [mm]
f _z	posuv na zub [mm]
k _u	koeficient rozšíření při stanovení rozšířené nejistoty [-]
l _n	vyhodnocovaná délka profilu [mm]
l _r	základní délka profilu [mm]
s(x)	směrodatná odchylka [mm]

n	otáčky [min^{-1}]
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [μm]
Rp	nejvyšší výška výstupku profilu [μm]
Rt	celková výška profilu [μm]
Rv	nejvyšší hloubka prohlubně profilu [μm]
Rz	největší výška profilu [μm]
U_C	rozšířená standardní nejistota [μm]
u_A	standardní nejistota typu A [μm]
u_B	standardní nejistota typu B [μm]
u_{B1}	nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu [μm]
u_{B2}	nejistota měřicího přístroje [μm]
u_C	kombinovaná standardní nejistota [μm]
v_c	řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_f	rychlost posuvu [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

ÚVOD

Bakalářská práce se zaměřuje na hodnocení drsnosti povrchu po vysokorychlostním obrábění, tedy na kvalitu obrobeného povrchu dvou vybraných materiálů.

Z důvodů rostoucího trendu rozvoje vědy a techniky, jsou stále více kladeny důrazy na problematiku jakosti strojních součástí. Jakost povrchu, tj. drsnost, resp. mikrogeometrie povrchu a vlastnosti povrchové vrstvy, ovlivňují velmi výrazně životnost a spolehlivost provozu součástí. Na drsnosti povrchu závisí přesnost chodu strojních součástí, jejich hlučnost, doba záběru, ztráty třením, elektrická vodivost, přestup tepla, únavová pevnost, odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi atd. Drsnost povrchu, tedy ovlivňuje průběhy chemických a fyzikálních jevů, které provázejí činnost funkčního povrchu dané součásti [1].

Podstata vysokorychlostního obrábění spočívá především v dosahování kratších časů při opracování a požadované zvýšení přesnosti a kvality obrobených ploch, převážně nepravidelných tvarů. Vysokorychlostnímu obrábění a drsnosti povrchu spolu s uvedeným návrhem prováděného experimentu je věnována teoretická část bakalářské práce. V rámci experimentální části, byla hodnocena drsnost povrchu v závislosti na navržených řezných parametrech a použitých řezných nástrojích.

Cílem bakalářské práce, je ověřit kvalitu obrobeného povrchu po vysokorychlostním obrábění a navrhnout nejvhodnější řezné parametry použitých nástrojů pro obrábění použitých materiálů.

1. ÚVOD DO VYSOKORYCHLOSTNÍHO OBRÁBĚNÍ

1.1 HSC – vysokorychlostní obrábění (High speed cutting)

Z důvodů rostoucí ekonomiky a tlaku výroby, nás nutí zavádět nové metody obrábění. Výroba obrobků neustále narůstá a zahrnuje velké množství tvarů ploch, také jsou kladeny vysoké nároky na jakost obrábění. Obrobky, které jsou vyráběny klasickými metodami obrábění, jsou velmi obtížně vyrobitelné a vyžadují vysoké náklady. Na požadavky trhu je nutné reagovat zaváděním nových metod obrábění jako je např. HSC – vysokorychlostní obrábění (High speed cutting).

Definice HSC obrábění je složitá. Není přímo pravdou, že konvekční obrábění přechází do oblasti vysokorychlostního obrábění od určité rychlosti. Nutno zohlednit ostatní podmínky vytvářející proces. Podmínkami je myšlen způsob obrábění, ale hlavně druh obráběného materiálu. V některé literatuře lze najít definice, kde se odborníci přiklání k definici, že o HSC jde tehdy, když střední teplota tavení, dosahuje hodnot blízkých teplotě tavení obráběného materiálu.

V praxi se můžeme setkat s názorem, že obrábění vysokými řeznými rychlostmi probíhá v oblasti od 600 do 1 800 m.min⁻¹, obrábění super řeznými rychlostmi nad 18 000 m.min⁻¹. V případě těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou slitiny niklu či titanu, se dává spíše přednost výrazu výkonové obrábění [2].

HSC technologie zahrnuje kromě vlastního obrábění i tzv. suché a tvrdé obrábění. Tzv. suché obrábění, sleduje vyloučení nebo minimalizaci užití řezných kapalin a redukci nákladů na jejich filtraci a recyklování. Mokrý obrábění, což znamená, obrábění kalených ocelí a jiných velmi tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu, náhradou za dříve užívanou technologii broušení [3].

Vysokorychlostní obrábění, sleduje zvýšení úběru třísek, kvality obráběného povrchu a životnosti nástroje, podstatným zvýšením řezné rychlosti při sníženém průřezu třísky a snížení řezné síly. Vysoká, relativní rychlost třísky, vzhledem k čelní ploše nástroje, spolu s novou kvalitou řezné hrany, zvyšuje podíl tepla řezného procesu, které odchází s třískou, snižuje tepelné i mechanické namáhání nástroje a prodlužuje jeho životnost. Redukce tepelných toků do nástroje, rámu stroje a do obrobku za současného snížení řezných sil přináší zvýšení přesnosti obrobku a kvality jeho povrchu [2].

Doposud se ještě nikomu nepodařilo adekvátně pojmenovat tuto sdruženou technologii, přesně vymežitelnou definicí, která by popsala a vystihla okolnosti, mechanismus a způsob vlastního obrábění a nad kterou by zavládla všeobecná shoda. Pojem obrábění, vysokými řeznými rychlostmi, naznačuje jen část celé pravdy o této technologii, proto již v úvodu je nutno připomenout, že se nejedná pouze o zmíněnou extrémně vysokou řeznou rychlost, jak by se mohlo zdát při prvním pohledu na věc, nýbrž také o vysoké rychlosti posuvů. Krátce řečeno se jedná o vysoce výkonné obrábění, při kterém se dosahuje velkých objemů obrobeného materiálu za časovou jednotku tzv. úběru [3].

1.2 Obrábění nasucho (Dry machining)

Technologií obrábění nasucho, rozumíme, obrábění v přirozeném prostředí, které je tvořeno pouze upraveným nebo neupraveným vzduchem.

Obrábění nasucho, spolu s kombinací geometricky daného ostří, ekonomických výhod a s pohledu ekologie, přináší nejefektivnější využití třískového obrábění. Tuto technologii obrábění je výhodné aplikovat zejména v souvislosti s vysokorychlostním obráběním [4].

V dnešní době, používané vysoké řezné rychlosti HSC obrábění, způsobují velmi horkou zónu řezu. Řez probíhá při teplotách nad 1000°C. To znamená, že procesní kapalina přivedená k břítu v záběru se ihned vypaří a nemá prakticky žádný chladicí význam. Přivedená procesní kapalina ochladí břit v době, když není v řezu a tak zvýrazní teplotní rozdíly, způsobující cyklické namáhání a vzniknou tepelné praskliny. To má za následek, snížení životnosti nástroje. Moderní řezné materiály, jako jsou cermety, řezná keramika, kubický nitrid boru a diamant jsou vyrobeny tak, aby vydržely vysoké teploty v řezu a řezné rychlosti [5].

1.2.1 Výhody obrábění nasucho

- zvýšení produktivity;
- při frézování bez procesní kapaliny se prodlouží životnost nástroje až o 40 % ;
- snížení výrobních nákladů;
- náklady na procesní kapalinu a následnou likvidaci tvoří 15 – 20 %; celkových nákladů, ale samotné nástroje tvoří jen 4 – 5 % nákladů;
- čistší a zdravější pracovní prostředí bez zápachu a bakterií;
- není potřebná údržba rozvodu a nádrží chladicí kapaliny, při tomto obrábění dochází k lepšímu utváření třísky [5].

1.3 Obrábění s použitím přivedené řezné kapaliny (Wet machining)

Obrábění nasucho je moderní a žádané, ale nemůže být použito na všechny obráběné materiály a technologie. Na tyto ostatní materiály, tedy musí být použito obrábění s přívodem procesní kapaliny.

Například obrábění tepelně odolných slitin se provádí při nízkých řezných rychlostech a s přívodem procesní kapaliny. Především však při frézování hlubokých drážek je potřeba použít procesní kapalinu. Procesní kapalina se také používá k omezení geometrické deformace, při obrábění tenkostěnných součástí, dále může být výhodná pro oplach součástek a části stroje od pilin a prachu nebo také díky svým vlastnostem na ochranu stroje před korozí. Je-li nutné frézovat „za mokra“, musí se přivádět velké množství procesní kapaliny a použít nástroj vhodný pro frézování za mokra i sucha [5].

V současnosti jsou materiály jako vysoce legovaná ocel, extra slitiny a především titanové slitiny obráběny zasucha. Nicméně stále existují aplikace, kde chlazení a mazání zůstane nepostradatelné i v blízké budoucnosti.

1.4 Řezný proces

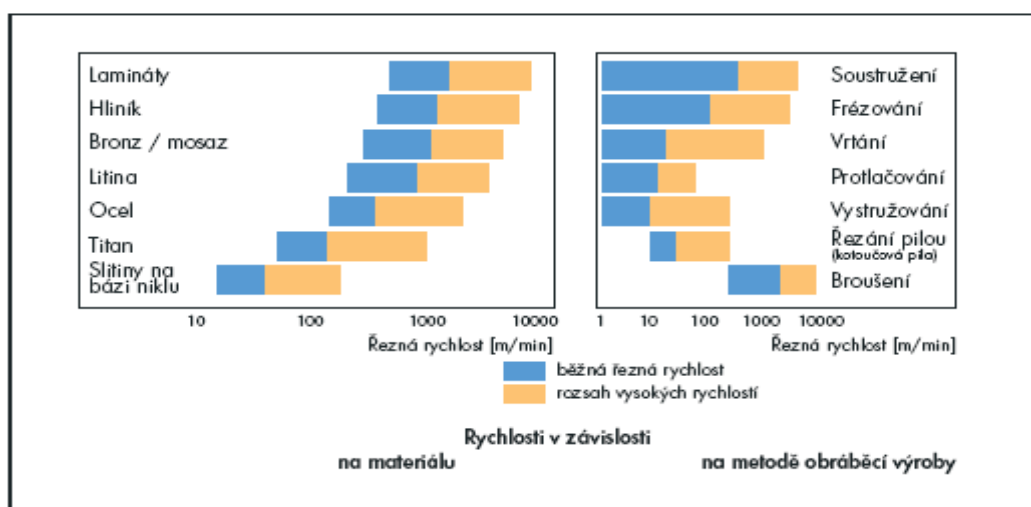
Efektivní řezání kovu nastává pouze, když si řezný materiál při určité teplotě a v prostředí řezného procesu, udrží výraznou převahu, tvrdost, oproti obráběnému materiálu.

Při zvyšování řezné rychlosti do oblasti vysokorychlostního obrábění, dochází k výrazně odlišným pochodům, než u konvenčního obrábění. V podmínkách HSC se teplota třísky, přiblíží tavné teplotě obráběného materiálu a při určité řezné rychlosti, dojde k náhlé změně řady metalurgických i mechanických vlastností třísky. Tříska zčervená, i kalená ocelová tříska změkne a sníží svou přítláčnou sílu na čelo bříty. Třecí síla i celkový řezný odpor klesnou, ztenčí se průřez třísky, zvýší se rychlost jejího odchodu z kontaktní zóny, sníží se plocha kontaktní zóny a omezí se sekundární nárůst teploty třísky třením v kontaktní zóně [3].

Další zvyšování řezné rychlosti již podstatně nezrychluje proces opotřebení bříty nástroje. Blesková změna teploty i mechanických vlastností třísky v rovině smyku, nastane také při vysokorychlostním „tvrdém“ obrábění kalené oceli, zde dojde při červené třísce k prudkému poklesu řezné síly. Poklesem řezných sil a snížením tepelného toku stoupne přesnost obrábění.

Velká teplota třísky je tedy pozitivním faktorem celého procesu a vlastně i zdrojem efektů HSC. Na následujícím obr. 1 je zobrazen rozsah řezných rychlostí při konvenčním a HSC obrábění [3].

Intenzivní „povodňové“ chlazení břitů nástroje řeznou kapalinou již není nutné ani žádoucí, neboť by bránilo dosažení vysokorychlostního režimu. Z hlediska zvýšené citlivosti současných řezných materiálů na tepelné šoky není kapalinové chlazení mnohdy ani přípustné. Použití procesních kapalin může být zcela eliminováno při „suchém“ obrábění [1].



Obr. 1 Rozsah řezných rychlostí při vysokorychlostním obrábění [3]

1.5 Mechanismus tvorby třísky u klasického obrábění

Podstatou progresivního obrábění je naprostá převaha požadovaných fyzikálních vlastností materiálu řezného nástroje nad obráběným. Předpokládá se, že s rostoucí řeznou rychlostí roste celkové množství tepla. Tady platí úměra s narůstající rychlostí stříhu třísky o nástroj. Plastickou deformaci třísky v rovině stříhu se „skokově“ mění její teplota, která dále roste třením třísky o čelo nástroje.

U klasického obrábění, dochází ve smykové rovině k mechanickému zpevnění třísky, které vede k jejímu ztvrdnutí oproti původnímu stavu. Tím, že zpevněná tříska klade větší odpor, narůstá úhel roviny stříhu, který zvyšuje tloušťku třísky i její odpor proti ohybu a současně zvětšuje plochu kontaktní zóny. Mezi třískou a čelem nástroje „spolupůsobí“ přitlačné i třecí síly, které tímto nabývají vysokých hodnot.

Dochází takto k přechodu velké části tepla vyvolaného třením z třísky do nástroje. Třecí teplo a značná přitlačná síla třísky podporující difusní procesy, které vedou k vymílání kráteru na čele nástroje.

Intenzita vývoje celkového procesního tepla roste úměrně se zvyšováním rychlosti smyku třísky ve smykové rovině, ale také s řezným odporem, který je dán obráběným materiálem [6].

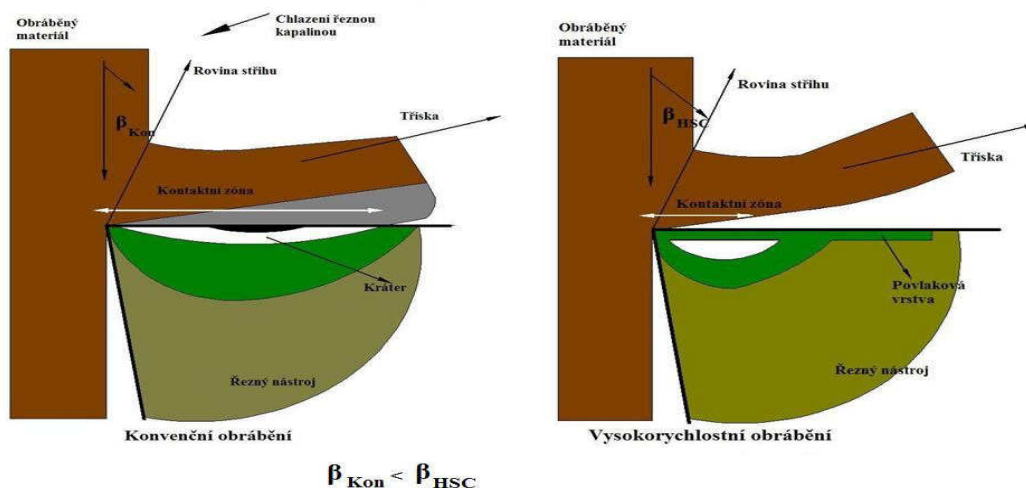
1.6 Mechanismus tvorby třísky při HSC obrábění

Přesnou hranici parametrů strojů a řezných podmínek, při kterých by se dalo hovořit o HSC obrábění nelze jednoduše stanovit. Náhlé změknutí třísky při dosažení určité teploty a odpovídající pokles řezné síly jsou efekty, které nejvíce souvisí s vysokorychlostním obráběním. Nejvýhodnější je pracovat v oblasti nejvyšších výkonů stroje, kde krouticí moment a výkon dosahují maximálních hodnot. Zejména při hrubování, kdy je potřeba velký výkon vřetena je vhodné pracovat v těchto oblastech. Mimo oblast jmenovitých otáček stroje, hlavně při malých průměrech nástroje je možné pracovat při obrábění na čisto [6].

To je způsobeno tím, že při obrábění na čisto malými průměry nástrojů je pro dosažení odpovídajících řezných podmínek potřeba vyšších otáček, ale nižších krouticích momentů a výkonů.

1.7 Porovnání konvekčních řezných procesů a procesů při HSC

Konvenční obrábění se výrazně projevuje v mechanismu tvorby třísky při porovnání s vysokorychlostním obráběním. Oddělování třísky je složitý proces, jehož průběh závisí zejména na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu a jejich závislosti na podmínkách plastické deformace. Plastickou deformací třísky v rovině smyku se rázem mění teplota, která roste třením třísky o čelo břitu. Se vzrůstající řeznou rychlostí roste množství tepla řezného procesu a to úměrně s narůstající rychlostí smyků třísky a intenzitou tření třísky o břit. Rozdíly mezi vysokorychlostním a konvekčním řezným procesem jsou zřetelné z obr. 2.



Obr. 2 Porovnání konvenčního a vysokorychlostního obrábění [2]

Výhody technologie HSC (vysokorychlostní obrábění)

- Významné zkrácení časů obrábění.
- Zvýšení posuvné rychlosti 5-10 krát.
- Vysoká kvalita obráběného povrchu.
- Vlivem vysoké řezné rychlosti je vzniklé teplo odváděno třískami.
- Poklesem řezných sil a snížením tepelného toku stoupne přesnost obrábění.
- Možnost aplikace obrábění bez chlazení [3].

Nevýhody technologie HSC (vysokorychlostní obrábění)

- Nákladné strojní vybavení.
- Speciální (drahé) nástroje a řezné materiály.
- Nutnost vyvažování rotačních nástrojů.
- Speciální přesné upínání řezných nástrojů a obrobků.
- Odstraňování velkého objemu třísek za jednotku času.
- Zvýšení intenzity otupování břitů.
- Nedostatečné odzkoušení technologických dat pro HSC projektování
- Pro tuto technologii obrábění jsou typické malé rozměry (průměry) nástrojů.
- Velké hodnoty zrychlení a zpomalení při startu a při zastavování včetně přinášející rychlejší opotřebení vedení, ložisek a uložení. Rostou náklady na opravu a údržbu [3].

1.8 Aplikace vysokorychlostního obrábění

Technologie vysokorychlostního obrábění HSC se používá pro obrábění prostorově složitých povrchů, jako jsou třeba zápustky, formy a jiné obrobky. Dále se tato technologie používá zejména pro frézování malými průměry fréz a soustružení. Technologií HSC se obrábějí především litiny a tvrdé materiály, jako například kalená ocel o tvrdosti okolo 60 HRC „tvrdost podle Rockwell“, ale také lehké kovy a jejich slitiny.

1.8.1 Použití HSC technologie

1. Obrábění s vysokým podílem hrubování při použití výkonných vřetenových jednotek. Příkladem je výroba integrálních dílů pro letecký průmysl, nebo sériová výroba v automobilovém průmyslu. HSC metodami se vyrábějí např. skříně převodovek, díly brzd, pumpy, hlavy válců atd. Materiálem zde jsou převážně slitiny hliníku.

2. Součásti z křehkých materiálů nebo součásti s tenkými stěnami náchylnými na deformace. Ty nelze konvenčními metodami úspěšně opracovat. Při obrábění vysokými rychlostmi vznikají jen malé síly, působící na obrobek a tím i malá pravděpodobnost deformace obrobku.

3. Obrábění součástí z materiálů citlivých na teplo vzniklé při řezném procesu. Opět se zde využívá vysokorychlostní obrábění, ale tentokrát efektu menších tepelných toků do materiálu obrobku z procesu řezání.

4. Výroba zápustek, forem, lisovacích nástrojů a elektrod. Zavedení HSC metod zde vytvořilo předpoklady pro optimalizaci celého výrobního procesu. Přínosem je, kromě zkrácení času výroby, také výrazné zkrácení výrobního řetězce, snížení rozpracovanosti výroby, náhrada některých nekonvenčních metod obrábění; to vše je umožněno značným zlepšením přesnosti a kvality povrchu. Z velké části odpadne také nutnost následného ručního dokončování povrchu formy. Typickými materiály zde je ocel, kalená ocel a měď [3].

1.8.2 Specifické použití HSC

HS frézování lehkých kovů

Pro vysokorychlostní frézování lehkých slitin, jsou sice potřebné poměrně vysoké investice, které ale přinášejí velkým nárůstem výkonu výrazný pokles výrobních nákladů a lepší kvalitu. Při HS frézování materiálů o větší pevnosti a tvrdosti, postačuje k dosažení výrazných úspor výrobních nákladů, upravit konveční stroje určitým způsobem. Tedy obráběcí stroj „normální koncepce“ vybavit vysokootáčkovým vřetenem a samozřejmě odpovídající ochranou [3].

Výkonové frézování (HPM – vysokoproduktivní obrábění) slitin titanu

Slitiny titanu jsou velice často používány v leteckém a energetickém průmyslu jako základní materiál pro výrobu rozváděcích kol a lopatek pro různé typy turbínových soustav. Zde lze totiž plně využít velmi dobré kombinace vlastností slitin na bázi titanu, jako jsou jejich pevnost, houževnatost (tuhost) a únavová pevnost při současné velmi nízké hmotnosti (hustotě).

Dnes se již začínají prosazovat v tomto oboru, nikoliv jako doposud, oddělená rozváděcí kola a jednotlivé lopatky, ale monobloky, kdy jsou oba díly vyráběny z jednoho kusu. To s sebou ale přináší vyšší nároky na vlastní obrábění, neboť množství odstraňovaného materiálu vzroste až o 90 %. To vše znamená při velmi problematickém obrábění právě titanu a jeho slitin nelehký úkol, který však lze zvládnout nasazením moderních metod obrábění jako jsou vysokorychlostní popř. suché obrábění (pro Ti – slitiny hovoříme o tzv. výkonovém obrábění) při současném velice striktním dodržení zásad a doporučení, které umožňují ekonomickou rentabilitu této výroby [3].

1.8.3 Příklady použití HSC v praxi

HSC frézování

HSC frézování karbidovými nástroji s povlaky TiAlN. Nástroje tohoto typu umožňují výkonové frézování vysoce pevných a kalených ocelí i vysocelegovaných chromových a niklových ocelí [3].

HSC soustružení

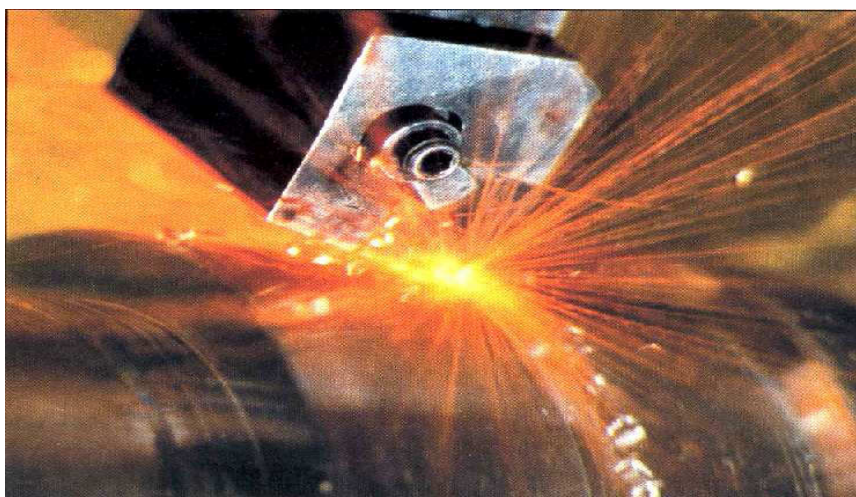
Hrubovací i dokončovací soustružení všech druhů materiálů patří rovněž mezi důležité aplikační oblasti HSC technologií. Tento obr. 3 ukazuje vysoce přesné dokončovací soustružení mosazných válcových povrchů polykrystalickým diamantem [3].



Obr. 3 HSC soustružení mosazných válcových povrchů [3]

HSC soustružení těžkoobrobitelného materiálu

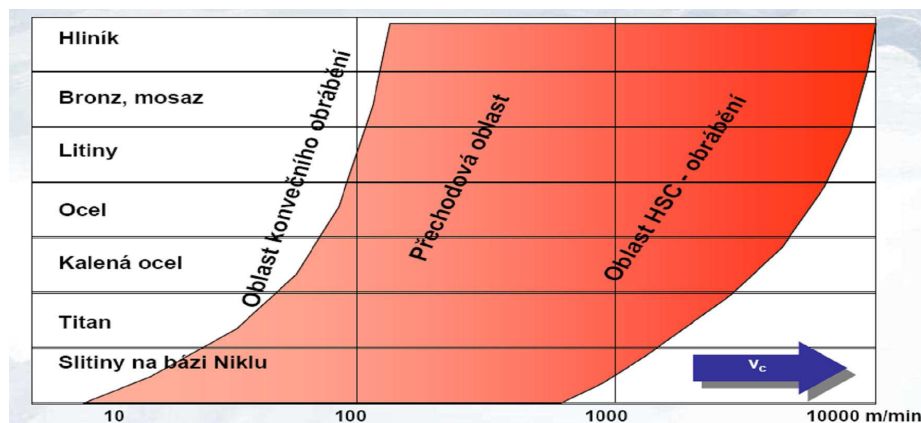
Z obrázku je dobře patrné soustředění vysoké teploty materiálu do místa řezu.



Obr. 4 HSC soustružení těžkoobrobitelného materiálu [3]

Přínosy HSC obrábění

Technologie obrábění vysokými rychlostmi, především frézování malými průměry fréz a soustružení, přinesla podstatné snížení výrobních časů a nákladů. Hlavně nárůst otáček způsobil snížení časů a výrobních nákladů, neboť v minulosti se tvrdé materiály obráběly zejména při malých řezných rychlostech a nízkých otáčkách. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny oblasti HSC efektu pro dané materiály (viz obr. 5) [3].



Obr. 5 Oblast HSC efektu pro dané materiály [19]

1.9 Frézování

Frézování je třískové obrábění různých součástí dvou a vícebřitým frézovacím nástrojem. Hlavní řezný pohyb (rotační) vykonává nástroj a vedlejší řezný pohyb (translační) vykonává obrobek na stole stroje, někdy tento pohyb vykonává také nástroj (např. konzolové frézky) [7].

Frézování má obrovské uplatnění při výrobě rovinných ploch u jednoduchých součástí, ale především při obrábění tvarových ploch složitých při dodržení přesnosti rozměru a kvality výrobku.

Frézy jsou více zubové nástroje, a při obrábění odebírá každý zub určitou část materiálu ve formě třísky. Zub je v záběru pouze jen na část otáčky a zbytek běží naprázdno. Proces řezu je přerušovaný, při chodu naprázdno se zub nástroje ochlazuje [8].

2. PROBLEMATIKA HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU

2.1 Struktura povrchu

Struktura povrchu je jedním z důležitých kritérií kvality výrobku, protože právě mikrogeometrie povrchu podmiňuje velmi výrazně životnost a spolehlivost provozu součásti stejně tak, jako i řadu spolu souvisejících parametrů, jako je např. hlučnost, opotřebení, atd. Pro objektivní hodnocení jakosti povrchu se posuzuje stále více parametrů, které podávají mnohem konkrétnější a ucelenější obraz o kontrolované ploše z pohledu mikrogeometrie.

Kvalita povrchu a vlastnosti povrchové vrstvy ovlivňují průběhy fyzikálních a chemických jevů při obrábění v povrchové vrstvě materiálu. Životnost a spolehlivost každé součásti je ovlivněna především vlastnostmi mikrogeometrie, jejich povrchové vrstvy. Nejdůležitější je sledování a vyhodnocování mikrogeometrie povrchu, čímž napomáháme ke zvýšení kvality, jakosti a efektivnosti zejména u strojních součástí. Tvary nerovností obrobených povrchů jsou velice rozmanité a liší se podle druhu použité metody obrábění [1].

Jedním z nejdůležitějších parametrů určujících výslednou kvalitu výrobku v oblasti metrologie je drsnost povrchu, která je hlavním činitelem při vzniku koroze pod napětím a vzniku únavového lomu, ke kterému dochází obvykle na povrchu nebo těsně pod povrchem součásti. Pro hodnocení jakosti strojních součástí má analýza drsnosti povrchu svůj neopomenutelný význam, na který je v metrologii a jakosti kladen stále větší důraz stejně tak, jako stále roste význam kontroly v systému řízení jakosti [7].

Kvalita obráběných ploch nás zajímá především z důvodů, protože ve většině případů obrobitelných ploch nám vznikají poruchy v praxi od povrchu. Na povrchu nám vznikají při namáhání, únavě a opotřebení praskliny a koroze [7].

2.2 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je jednou z úchylek, které jsou chápány jako rozdíly skutečného tvaru plochy a tvaru plochy jmenovité. Tyto úchylky řadíme k hodnotám, které určují mikrogeometrii povrchu obrobené plochy. Mezi další patří např. úchylky tvaru, vlnitost,

strukturální změny, apod. Všechny tyto úchytky povrchu vznikají v důsledku nedokonalosti a nepřesnosti při výrobě [7].

Moderní konstrukce jsou z velké části namáhány dynamicky. Mnoho konstrukcí je závislých na struktuře a vlastnosti materiálu. Většina únavových lomu vzniká na povrchu, nebo těsně pod povrchem součástí.

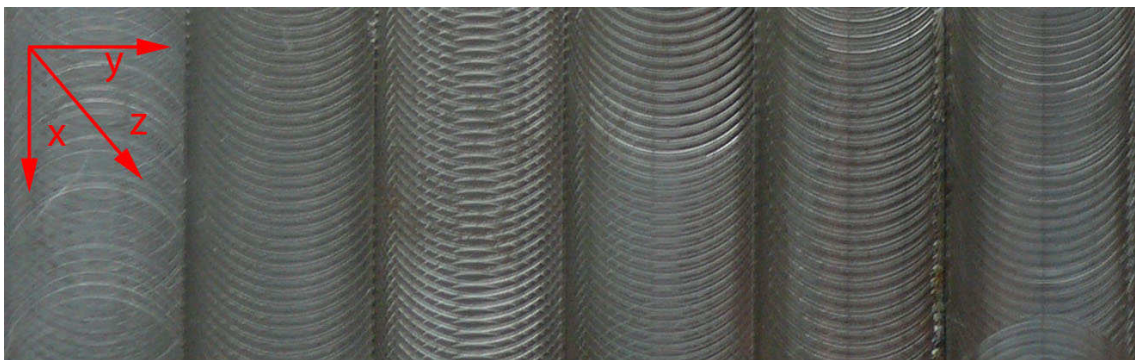
Drsnost povrchu významně ovlivňuje vlastnosti funkčních, ale i volných povrchů součástek. Je jedním z parametrů, který určuje použitelnost jednotlivých součástek v rámci různých konstrukčních celků. Při stanovování jednotlivých parametrů drsnosti povrchu je v práci postupováno podle normy v České republice normalizované pomocí převzaté mezinárodní normy ČSN EN ISO 4287 s platností od roku 1999 nazvané Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu [9].

Určení výsledné drsnosti povrchu je složitý proce, kterému předchází celá řada úkonů a ovlivňuje je celá řada různých faktorů, které musí být zohledněny. Každý způsob opracování a použité technologie výroby zanechává na povrchu součástky výstupky a hrbolky, které nazýváme nerovnost povrchu [7].

2.3 Princip měření drsnosti povrchů

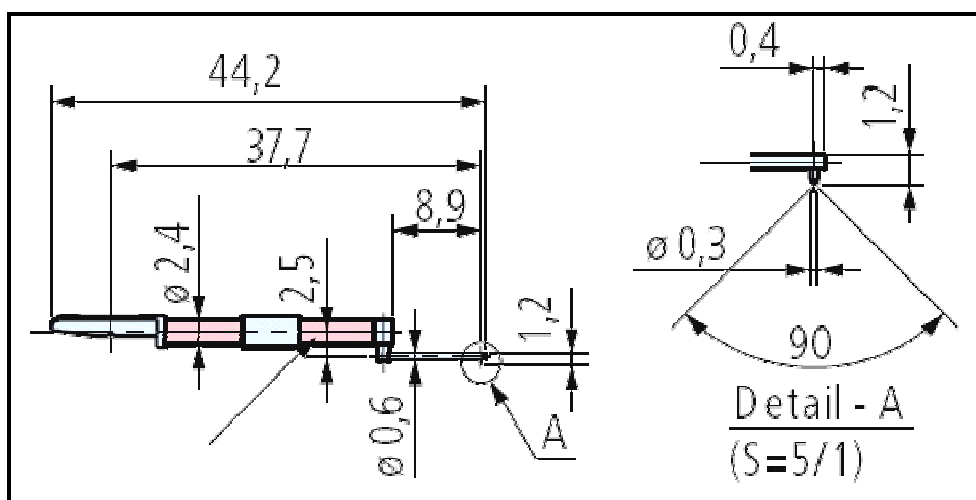
Měření drsnosti povrchů v práci bylo provedeno pomocí přístroje Surftest SJ-401, kde dotykový hrot snímá jednotky přístroje Surftest SJ-401 zaznamenává drobné nepravidelnosti povrchu měřeného výrobku. Drsnost povrchu se stanoví na základě vertikálního posunu dotykového hrotu způsobeného přejížděním hrotu po povrchu [9].

K vyhodnocení dat slouží software SJ-Tools použitelný pro drsnoměry SJ-201, SJ-301, SJ-401. Vyhodnocovací software je vytvořen na bázi programu Excel firmy Microsoft. Umožňuje tedy řízení měřicího přístroje, definici podmínek měření, grafické zobrazení profilu měření, archivaci měřicího protokolu a dokumentaci naměřených výsledků [9].



Obr. 6 Opracovaný materiál pro měření parametrů drsnosti povrchu

V měření je používáno snímače s označením 12AAC733 a rádius hrotu snímače má délku 2 μm (viz obr. 7). Minimální rozlišení snímacího dotyku je 0,000125 μm a měřicí síla 4 mN.



Obr. 7 Snímací dotek 12AAC733 [10]

2.4 Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu

Normalizované charakteristiky drsnosti povrchu jsou následující:

1. Průměrná aritmetická úchylka R_a
2. Největší výška profilu R_z
3. Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q
4. Celková výška profilu R_t
5. Nejvyšší výška výstupku profilu R_p
6. Největší hloubka prohlubně profilu R_v

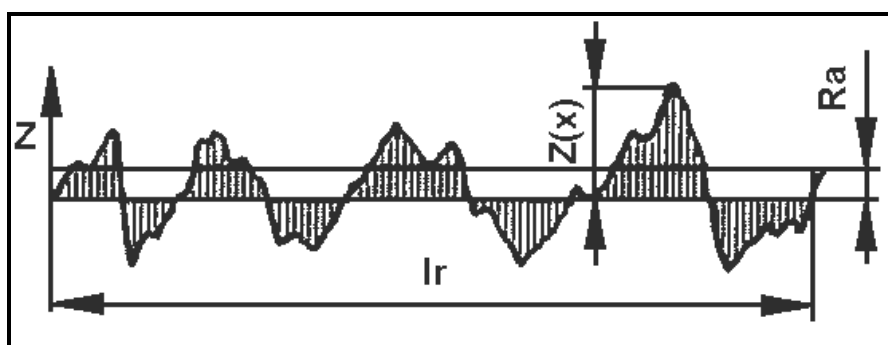
Průměrná aritmetická úchylka Ra

Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . Vypovídací schopnost parametru Ra je nízká, Ra nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu. (viz obr. 8) [11].

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$

$Z(x)$výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x [μm];

l_rzákladní délka profilu [mm].



Obr. 8 Parametr Ra [11]

Největší výška profilu Rz

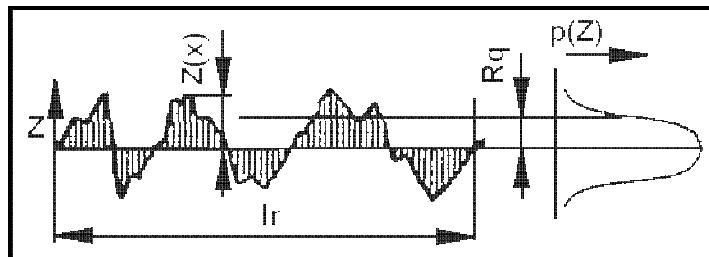
Součet výšky Z_p největšího výstupku a hloubky Z_v nejnížší prohlubně v rozsahu základních délek l_r . (viz. obr. 10) [11].

Průměrná kvadratická úchylka profilu Rq

Průměrná kvadratická hodnota pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r . Parametr Rq má význam při statickém pozorování profilu povrchu, neboť zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic (viz obr. 9) [11].

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} \quad [\mu\text{m}]$$

$Z(x)$výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x [μm].



Obr. 9 Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q [11].

Celková výška profilu R_t

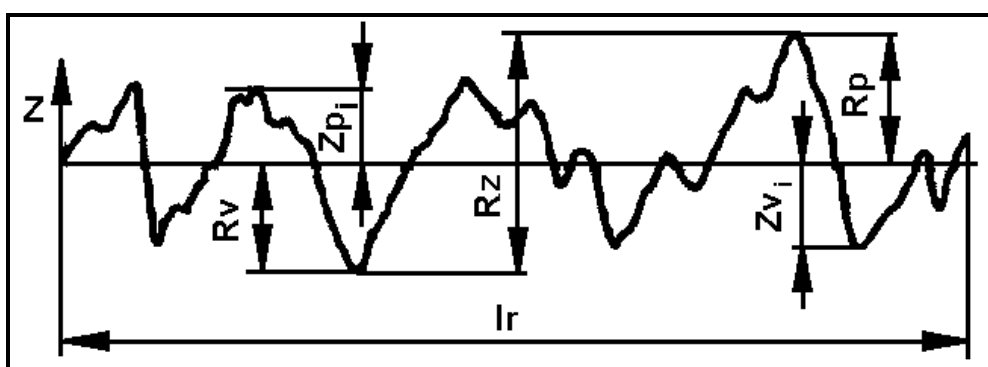
Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku a hloubky Z_v nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky l_r [μm]. Využití parametry R_t , nevychází ze střední čáry a velikost je ovlivněna rýhami, nebo nečistotami na kontrolovaném povrchu.

Nejvyšší výška výstupku profilu R_p

Výška největšího výstupku profilu Z_p v rozsahu základní délky l_r (viz obr. 10) [11].

Největší hloubka prohlubně profilu R_v

Hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r (viz obr. 10) [11].



Obr. 10 Parametry R_p , R_v , R_z [11]

3. NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI PRÁCE

Úkolem bakalářské práce je vyhodnotit vliv vysokorychlostního frézování na kvalitu obrobeného povrchu. Experiment bude prováděn na univerzálním 5-ti osé CNC frézovací centrum DMU 60 MonoBLOCK® s NC otočným stolem firmy Deckel Maho, s použitím třech frézovacích nástrojů od firmy KENNAMETAL. V samotném experimentu budou testovány dva materiály Ocel 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128, Bolzanova ocel ASP 2023 (ENHS 6-5-3).

V rámci experimentální části bude hodnocena drsnost povrchu v závislosti na navržených řezných parametrech a použitých řezných nástrojích.

Před samotným testováním bude nejprve povrch materiálu ofrézován a zarovnán konvečním frézováním na uvedeném stroji.

Předpokladem při obrábění vysokými rychlostmi řezání je, že se projeví efekt zvýšené kvality povrchu po obrobení při zvyšujících rychlostech posuvu nad jeho hodnotu ($v_f = 15 \text{ m.min}^{-1}$). Při volbě vhodné optimalizace řezných podmínek v oblasti HSC přinese výrazné zlepšení kvalitativních aspektů obrábění.

3.1 Použitý stroj

Pro experiment bylo vybráno univerzální 5-ti osé CNC frézovací centrum DMU 60 MonoBLOCK® s NC otočným stolem firmy Deckel Maho. Považovaný stroj nám umožní nastavení vysokých otáček včetně stroje v rozsahu od 1 do $24\,000 \text{ min}^{-1}$ a nastavení pracovního posuvu až 24 m.min^{-1} .

Frézovací centrum DMU 60 MonoBLOCK® viz *příloha A*, patří do skupiny mezi vysoce produktivní obráběcí stroje se zajištěnou požadovanou přesností, a zaručuje nezbytnou tuhost stroje. Stroj je vybaven 3D softwarem a DMG řídicím panelem s 15“ TFT obrazovkou. Perfektní řešení pro mechanické a elektronické požadavky strojů DMG s ohledem na přesnost, výkon a měřicí technika. Velké možnosti provozních jednoduchosti jsou dostupné pro provozovatele ve standardních konfiguracích. Základním řídicím systémem stroje je Heidenhain iTNC 530 [12].

3.2 Použité nástroje

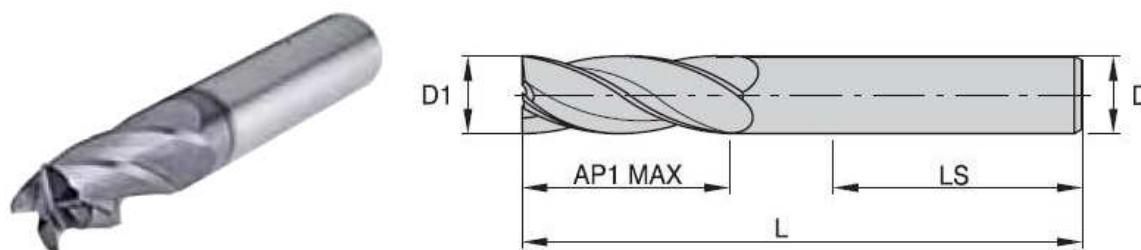
K experimentu budou použity frézovací nástroje od společnosti Kennametal Europe GmbH s označením F3AH1600ADL30, F3AH1800ADL30 a F4AJ1800ADN30.

Společnost Kennametal je řazena mezi přední světové dodavatele nástrojů, obráběných komponentů a moderních materiálů používaných ve výrobních procesech.

V oblasti HSC jsou většinou k určitému druhu obráběného materiálu přiřazeny pouze jednotné druhy materiálu a úzké výběrové pásmo pro velikosti jednotlivých úhlů určujících geometrii břitu, a proto možnost volby geometrie i materiálu je velmi malá.

Fréza F4AJ1800ADN30

Fréza má karbidovou čtyřbitovou stopku o průměru 18 mm a stoupání šroubovice je 30°. Nástroj má stejné parametry použití jako u fréz typu F3AH1600ADL30. V příloze B je uvedena katalogová karta frézy F4AJ1800ADN30. Fréza F4AJ1800ADN30, která byla použita pro laboratorní experiment, je zobrazena na obr. 11 a rozměry používané frézy jsou uvedeny v tab. 1.



Obr. 11 Fréza F4AJ1800ADN30[13]

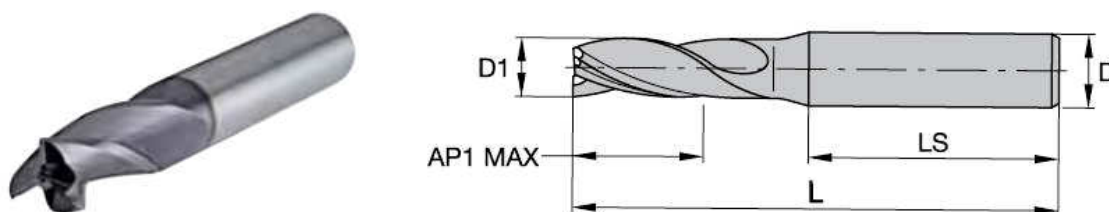
Tab.č.1 Parametr frézy F3AH1600ADL30 [13]

D ₁ [mm]	D [mm]	AP1 MAX [mm]	LS [mm]	L [mm]	ZU [počet břitů]
18	18	32	48	92	4

Fréza F3AH1600ADL30

Fréza má karbidovou tříbitovou stopku o průměru 16 mm a stoupání šroubovice je 30°. Nástroj je vhodný pro dokončovací frézování. Fréza je určena pro obrábění materiálu P, M, K, S a také pro obrábění materiálu N. Tato fréza byla použita pro vysokoproduktivní obrábění díky tuhému tělesu a konstrukci.

Při použití této frézy pro vysokorychlostní řezání musí být dostatečně zajištěna velká zubová mezera, která nám zaručí bezproblémový odvod třísek. Fréza F3AH1600ADL30 je zobrazena na obr. 12 a v tab. 2, jsou uvedeny rozměry frézy. Katalogový list frézy F3AH1600ADL30 je uveden v příloze C,D [13].



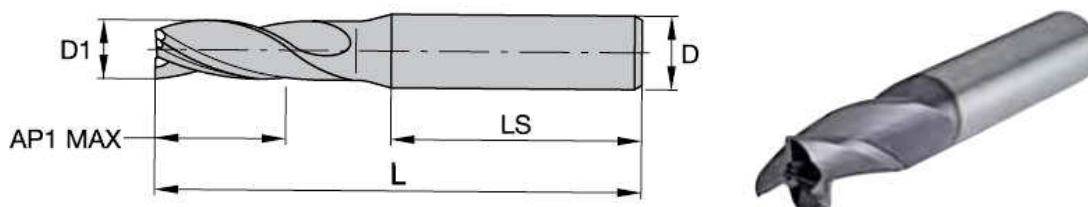
Obr. 12 Fréza F3AH1600ADL30 [13]

Tab. 2 Vybrané parametry frézy F3AH1600ADL30 [13]

D ₁ [mm]	D [mm]	AP1 MAX [mm]	LS [mm]	L [mm]	ZU [počet břitů]
16	16	26	48	92	3

Fréza F3AH1800ADL30

Fréza typu F3AH1800ADL30 je skoro stejná jako fréza typu F3AH1600ADL30, liší se pouze jenom v rozměrech $D_1 = 18$ [mm] „řezný průměr nástroje“ a $D = 18$ [mm] „průměr stopky nástroje“. Další sledované parametry frézy typu F3AH1800ADL30 zůstávají stejné jako u dvou předešlých typů.



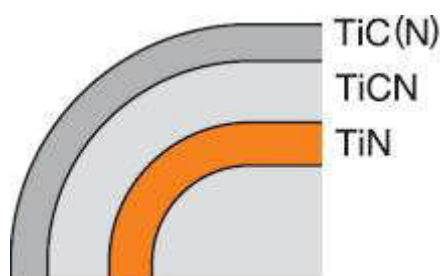
Obr.13 Fréza typu F3AH1800ADL30 [13]

Fréza F3AH1800ADL30 je zobrazena na obr. 13 a rozměry frézy jsou uvedeny v tab. 3. Katalogový list frézy F3AH1800ADL30 je uveden v příloze C,D [13].

Tab. 3 Parametr frézy F3AH1800ADL30 [13]

D ₁ [mm]	D [mm]	AP1 MAX [mm]	LS [mm]	L [mm]	ZU [počet břitů]
18	18	26	48	92	3

Všechny tři typy uvedených fréz, jsou celokarbidové s PVD a mají vícevrstvé povlakování např. TiN, TiCN a TiC(N). Povlaky používáme pro suché, nebo tvrdé obrábění.



Obr. 14 Schéma vícevrstvého povlaku použitých fréz [14]

Během experimentu nebyla používána procesní kapalina, protože při „HSC“ obrábění nám procesní kapalina zabraňuje dosažení vysokorychlostního procesu. Při vysokorychlostním obrábění „HSC“ se používá pouze minimální množství mazacího média protože při „HSC“ obrábění mluvíme jako o „suchém“ obrábění.

3.3 Materiálové vzorky

V experimentech byly použity dva druhy materiálů:

- Ocel 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128
- Bolzanova ocel ASP 2023 (ENHS 6-5-3)

Ocel 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128

Ocel má zvláštní vlastnosti, patří do kategorie nízkolegovaných svařitelných žárovevných oceli. Používáme pro práci za zvýšených teplot v oblasti meze kluzu i meze tečení. Ocel se používá především na koutové svary, nebo pro součástí energetických a chemických zařízení, pracujících při teplotách do 580°C.

V následujících tab. 4, jsou uvedeny chemické vlastnosti složení oceli, a tab. 5 jsou uvedeny mechanické vlastnosti oceli [15].

Tab. 4 Chemické složení oceli 15 128 (13MoCrV6)

Obsah prvků	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S
[%]	0,10 0,18	0,45 0,70	0,15 0,40	0,50 0,75	0,40 0,60	0,22 0,35	max 0,040	max 0,040

Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli 15 128 (13MoCrV6)

Mechanické vlastnosti	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A5 [%]	Tvrdost [HB]	E [MPa]
15 128 (13MoCrV5)	294	470-640	17	135-183	214

Bolzanova ocel ASP 2023 (ENHS 6-5-3)

Ocel ASP 2023 je bezkobaltová rychlořezná ocel pro vysokovýkonné nástroje a pro práci za studena práškovou metalurgií. Řadu ASP 2000 dodává pro Bohdan Bolzano Steel a.s. výrobce Erasteel (Švédsko a Francie). Jedná se o materiál s vysokou pevností, houževnatostí a odolností proti otěru. Materiál se dodává standardně s tvrdostí 62 HRC. V tab. 6 jsou uvedeny chemické vlastnosti složení oceli ASP 2023.

Tab. 6 Chemické složení oceli ASP 2023 (ENHS 6-5-3)

Obsah prvků	C	Cr	Mo	W	Co	V
[%]	1,28	4,1	5,0	6,4	-	3,1

Použití oceli je především na nástroje pro ražení, raznice pro děrování, nástroje pro protlačování za studena, nástroje pro jemné stříhání, stříhadla a nástroje pro výrobu šroubu a matic. Při nitridaci se doporučuje tenká difundovaná zóna o tloušťce 2-15 μm . V případě požadavku může být povrch nástrojů z této oceli valorizován.

3.4 Řezné podmínky pro daný experiment

Pro daný experiment byly nastaveny řezné podmínky pro čelní sousledné frézování na stroji DMU 60 MonoBLOCK®. Nastavené řezné parametry pro zvolené navržené vzorky materiálu jsou uvedeny v následující tab. 7.

Tab. 7 Řezné parametry použité při experimentu

Označení materiálu	Vzorek materiálu	Hloubka řezu a_p [mm]	Posuv na zub f_z [mm]	Průměr frézy D_1 [mm]	Počet břitů frézy z [mm]	Katalogové označení frézy [-]
Ocel 15 128	1.část	0,25	0,25	18	4	F4AJ1800ADN30
	2.část	0,25	0,33	16	3	F3AH1600ADL30
Ocel ASP 2023	1.část	0,25	0,33	16	3	F3AH1800ADL30
	2.část	0,25	0,25	18	4	F4AJ1800ADN30

Pro navržené vzorky materiálu, byly použity následující rychlosti posuvu v_f a při daných otáčky n uvedené v tab. 8. Dále byla spočítána řezná rychlost pro frézu s průměrem 18 mm pomocí vzorců (1, 2). Vypočtené hodnoty řezné rychlosti jsou také uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 Rychlosti posuvu v_f , otáčky n , řezná rychlost pro frézu s průměrem 18 mm

Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
5	5 000	282,7
10	10 000	565,5
15	15 000	848,2
20	20 000	1131,0
24	24 000	1357,2

Příklad výpočtu pro materiál 15 128 (13MoCrV6) fréza typu F4AJ1800ADN30

($z = 4 \text{ mm}$, $D_1 = 18 \text{ mm}$), řezné parametry použité při experimentu posuv na zub $f_z = 0,25 \text{ mm}$, otáčky $n = 15\,000 \text{ min}^{-1}$.

$$v_f = f_n \cdot n = f_z \cdot z \cdot n \quad [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1)$$

$$v_f = 11 \cdot 15\,000 = 0,25 \cdot 4 \cdot 15\,000$$

$$\underline{\underline{v_f = 15\,000 \text{ } [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] = 15 \text{ } [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]}}$$

Příklad výpočtu pro řeznou rychlost v_c při vysokorychlostním frézování pro průměr frézy $D_1 = 18 \text{ mm}$ a otáčky $n = 15\,000 \text{ min}^{-1}$ se vypočítají stejně jako u konvenčního frézování ze vztahu.

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2)$$

$$v_c = \frac{\pi \cdot 18 \cdot 15000}{1000}$$

$$\underline{\underline{v_c \doteq 848,2 \text{ } [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]}}$$

V navrhovaném experimentu bude po vysokorychlostním obrábění na frézovacím centru DMU 60 MonoBLOCK® na navržených vzorcích materiálu hodnocena kvalita povrchu po obrobení a také budou sledovány parametry drsnosti povrchu v příčném a podélném řezu pomocí zařízení drsnoměru SurfTest SJ-401.

3.5 Měřicí přístroj pro měření parametrů drsnosti povrchu

Měření parametrů drsnosti povrchu bylo provedeno na dotykovém měřicím přístroji „drsnoměru SurfTest SJ-401“ od společnosti MITUTOYO v prostorách Katedry obrábění a montáže Fakulty strojní VŠB-TU Ostrava.

Měřicí zařízení SJ-401 je dotykový (hrotový) přístroj pro měření drsnosti povrchů určený pro dílenské použití. Přístroj SJ-401 umožňuje hodnocení struktury povrchu, vlnitosti povrchu a mnoha dalších parametrů podle různých národních a mezinárodních norem. Umí vyhodnocovat až 46 parametrů. Naměřené hodnoty se zobrazují digitálně nebo graficky na dotykovém displeji, s možností výstupu na zabudované tiskárně.

Základní technické parametry drsnoměru Surftest SJ-401 [10]

Název funkcí	Parametry
Rozsah osy X (posuv)	25 mm
Rozsah osy Z (zdvih)	800 μm
Měřicí rychlost	0,05; 0,1; 0,5; 1,0 mm.s^{-1}
Zpáteční rychlost	0,5; 1,0; 2,0 mm.s^{-1}
Posuv (rozsah osy X)	25 mm (SJ-401) a 50 mm (SJ-402)
Zdvih (rozsah osy Z)	800 mm
Provozní teplota	5 °C až 35 °C
Relativní vlhkost	85 % relativní vlhkosti
Připojení na SW	SURFPAK-SJ

Parametry měření:

- základní délka profilu (cut-off) $l_r = 0,8 \text{ mm}$,
- vyhodnocovaná délka profilu $l_n = 4 \text{ mm}$,
- rychlost snímání: $0,5 \text{ mm.s}^{-1}$,
- použitý filtr: Gaussuv.



Obr. 15 Použitý měřicí přístroj pro měření drsnosti povrchu vzorků [10]

4. PROVEDENÍ EXPERIMENTU A MĚŘENÍ DRNOSTI POVRCHU

Experimentální část práce byla provedena podle návrhu experimentu za spolupráce Institute of Mechanical Technology from Poznań University of Technology in Poland. Použité materiály v experimentální části byly ocel 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128 a Bolzanova ocel ASP 2023 (ENHS 6-5-3). Experiment byl prováděn na stroji DMU 60 MonoBLOCK® od výrobce Deckel Maho a použité nástroje od firmy KENNAMETAL. Před vlastním testováním povrchu byl frézovaný materiál zarovnáán frézováním na uvedeném stroji [10].

Tab. 9 Řezné parametry použité při experimentu pro ocel 15 128 (1. část)

Ocel 15 128 (1. část)			
$a_p = 0,25 \text{ mm}; f_z = 0,25 \text{ mm}; D_1 = 18 \text{ mm}; z = 4$			
Plocha číslo	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
23	5	5 000	282,7
24	10	10 000	565,5
25	15	15 000	848,2
26	20	20 000	1131
27	24	24 000	1357,2

Tab. 10 Řezné parametry použité při experimentu pro ocel 15 128 (2. část)

Ocel 15 128 (2. část)			
$a_p = 0,25 \text{ mm}; f_z = 0,33 \text{ mm}; D_1 = 16 \text{ mm}; z = 3$			
Plocha číslo	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
28	5	5 000	251,3
29	10	10 000	502,7
30	15	15 000	754,0
31	20	20 000	1005,3
32	24	24 000	1206,4

Tab. 11 Řezné parametry použité při experimentu pro ocel ASP 2023
(1. část)

Ocel ASP 2023 (1. část)			
$a_p = 0,25 \text{ mm}; f_z = 0,33 \text{ mm}; D_1 = 16 \text{ mm}; z = 3$			
Plocha číslo	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
13	15	15 000	754,0
14	20	20 000	1005,3
15	24	24 000	1206,4
16	10	10 000	502,7
17	5	5 000	251,3
18	1	1 000	50,3

Tab. 12 Řezné parametry použité při experimentu pro ocel 15 128 (2. část)

Ocel ASP 2023 (2. část)			
$a_p = 0,25 \text{ mm}; f_z = 0,25 \text{ mm}; D_1 = 18 \text{ mm}; z = 4$			
Plocha číslo	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Otáčky n [min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
19	15	15 000	848,2
20	20	20 000	1131,0
21	24	24 000	1357,2
22	10	10 000	565,5

4.1 Naměřené hodnoty a vyhodnocení výsledku drsnosti povrchu

Drsnost povrchu vzorků bude měřena 10 krát ve dvou směrech, podélném směru tj. ve směru posuvu frézování (osa x) a v příčném směru tj. ve směru frézování (osa y).

Značení pro jednotlivá měření parametrů drsnosti povrchu

Označení jednotlivých měření parametrů drsnosti povrchu byl navržen rozlišovací systém.

00 - 0 - 1 X 22	(materiál; počet břitů frézy; rychlost posuvu v_f ; směr měření; číslo měření)
00	označení materiálů (15 128 a ASP 2023)
0	3 nebo 4 břitové frézy
1	rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹] viz tab.13
X	směr měření: A - ve směru osy x; B - ve směru osy y
22	číslo měření

Tab. 13 Řezná rychlost u 3 břitové frézy ocel 15 128 a ASP 2023

3 břitá fréza		Ocel 15 128	Ocel ASP 2023
Hodnota	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
1	1	-----	50,3
2	5	251,3	251,3
3	10	502,7	251,3
4	15	754,0	502,7
5	20	1 005,3	754,0
6	24	1 206,4	1 005,3

Tab. 14 Řezná rychlost u 4 břitové frézy ocel 15 128 a ASP 2023

4 břitá fréza		Ocel 15 128	Ocel ASP 2023
Hodnota	Rychlost posuvu v_f [m.min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]
2	5	282,7	-----
3	10	565,5	565,5
4	15	848,2	848,2
5	20	1 131,0	1 131,0
6	24	1 357,2	1 357,2

Příklad použití značení parametrů drsnosti povrchu

15-3-2A1 » (materiál 15 128; 3 břitová fréza; rychlost posuvu $v_f = 5$ [m.min⁻¹]

a tomu odpovídá řezná rychlost $v_c = 251,3$ [m.min⁻¹]; směr měření je osa x;
číslo měření 1)

19-4-3B1 » (materiál ASP 2023; 4 břitová fréza; rychlost posuvu $v_f = 10$ [m.min⁻¹];

a tomu odpovídá řezná rychlost $v_c = 565,5$ [m.min⁻¹]; směr měření je osa y;
číslo měření 1)

Tabulky naměřených hodnot

V tab. 15 jsou uvedeny hodnoty drsnosti povrchu pro ocel 15 128 (13MocrV6) dle ČSN 41 5128, číslo vzorku je 15-3-2A1, pro opracování byla použita 3 břitová fréza, při rychlosti posuvu $v_f = 5 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$ a tomu s odpovídající řeznou rychlostí $v_c = 251,3 \text{ [m.min}^{-1}\text{]}$. Měření bylo prováděno ve směru osy x, číslo měření 1.

Tab. 15 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro vzorek 15-3-2A1

Číslo měření i	Označení měření x_i	Měřené parametry drsnosti povrchu					
		Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]
1	15-3-2A1	4,26	23,00	5,20	23,70	9,80	12,00
2	15-3-2A2	3,75	22,50	5,22	23,60	8,70	13,40
3	15-3-2A3	4,12	24,80	5,40	24,20	12,70	12,10
4	15-3-2A4	4,20	23,10	5,30	24,50	10,80	13,60
5	15-3-2A5	4,14	22,90	5,30	23,80	9,20	13,50
6	15-3-2A6	4,13	22,50	5,48	24,70	10,90	12,50
7	15-3-2A7	3,80	22,40	5,46	23,90	8,50	13,00
8	15-3-2A8	4,10	24,50	5,23	24,20	9,90	13,20
9	15-3-2A9	4,23	23,40	5,26	27,70	11,80	12,40
10	15-3-2A10	4,15	21,90	5,42	24,40	9,00	13,30
Součet naměřených hodnot $\sum_{i=1}^n x_i$		40,88	231,00	53,27	244,70	101,30	129,00
Arit. průměr hodnot $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$		4,09	23,10	5,33	24,47	10,13	12,90

4.2 Testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou

Po naměření hodnot byla provedena kontrola na hrubé chyby, které mohly vzniknout při samotném měření. Hrubé chyby, které vznikají nesprávným měření, vadou přístroje, nesprávným odečtením hodnot, nesprávnou manipulací s měřidlem, musí být ze souboru naměřených hodnot vyloučeny. Uvedené vzorce jsou použity z literatury [11].

Postup pro zjišťování hrubé chyby [11]:

1. ze souboru naměřených hodnot $x_1 < x_2 \dots < x_n$ se vypočítá jejich hodnota \bar{x} - průměrná hodnota,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \text{ kde} \quad (3)$$

x_i naměřené hodnoty veličiny;

n počet měření.

Příklad výpočtu střední hodnoty \bar{x} (uvedené hodnoty jsou z tab. 15)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{40,88}{10} = \underline{\underline{4,088 \text{ } [\mu m]}}$$

a výběrová směrodatná odchylka $s(x)$:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \text{ kde} \quad (4)$$

x_i naměřené hodnoty veličiny;

\bar{x} průměrná hodnota;

n počet měření.

Příklad výpočtu výběrové směrodatné odchylky $s(x)$ (uvedené hodnoty jsou z tab.15)

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,4173}{10-1}} = \underline{\underline{0,2153 \text{ } [\mu m]}}$$

2. Pro posouzení odlehlosti podezřelých hodnot souboru (x_2, x_n) se vypočítají normované hodnoty H_2, H_n :

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} \quad \text{popřípadě} \quad H_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)}, \text{ kde} \quad (5)$$

x_i naměřené hodnoty veličiny;

\bar{x} průměrná hodnota;

$s(x)$ výběrová směrodatná odchylka;

n počet měření.

3. Z tabulek se určí mezní hodnota H pro předem stanovenou pravděpodobnost p a počet měření v souboru n . Mezní hodnota H pro pravděpodobnost $p=95\%$ a pro počet měření $n = 10$ je $H = 2,18$.

Za předpokladu, že $H_2 < H$ a $H_n < H$ hodnota x_2 není zatížená hrubou chybou a ponechává se v souboru, ale hodnota x_n je ovlivněna chybou a ze souboru naměřených hodnot se vyloučí [11].

Příklad výpočtu normované hodnoty H_2

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)} = \frac{4,088 - 3,75}{0,2153} = \underline{\underline{1,5699}}$$

vypočtená hodnota $H_2 < 2,18$, pak hodnota x_2 není zatížena hrubou chybou, která se nechá v souboru při vyhodnocení hodnot měření.

4.3 Nejistoty měření

Při stanovení nejistot měření, byla stanovena pro každý měřený povrch drsnosti standardní nejistota typu A (u_A), standardní nejistota typu B (u_B) a kombinovaná nejistota (u_C).

Standardní nejistota typu A (u_A) se zjistí výpočtem směrodatné odchylky $s(\bar{x})$ je dána vztahem (6) [17].

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \text{ kde} \quad (6)$$

$s(\bar{x})$ směrodatná odchylka;

x_i naměřené hodnoty veličiny;

\bar{x} průměrná hodnota výběru;

n počet měření.

Příklad výpočtu nejistoty měření - standardní nejistota typu A (u_A):

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{0,4173}{10 \cdot (10-1)}} = \underline{\underline{0,0681 \text{ } [\mu m]}}$$

Nejistota je získaná z opakovaného měření, hodnota s počtem měření klesá. Po případ malého počtu měření $n < 10$ je hodnota určená pomocí vztahu (6) málo spolehlivá. Nejistotu typu A doplníme nejistotou typu B.

Standardní nejistota typu B (u_B) je hodnota nezávislá na počtu měření. Ovlivňuje především prostředí měření (teplota, vlhkost, vibrace), měřený objekt (hodnota a typ odchylky tvaru, vlnitost, drsnost, materiál), obsluha měřicího zařízení (nastavení hrotu, vliv opěrné patky snímacího přístroje) [17].

Standardní nejistoty typu B (u_B) je dána vztahem (7)

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2}, \text{ kde} \quad (7)$$

u_{B1} nejistota vlivu opěrné paty snímacího hrotu;

u_{B2} nejistota měřicího přístroje.

Hodnota nejistoty vlivu opěrné patky snímacího hrotu u_{B1} byla stanovena pro rovnoměrné pravoúhlé rozdělení hustoty pravděpodobnosti (tzn. výskyt kterékoliv hodnoty z intervalu omezeného chybou je stejně pravděpodobný) vztahem [18].

$$u_{B1} = \frac{z_{1 \max}}{k}, \text{ kde} \quad (8)$$

$z_{1 \max}$ maximální odchylka j-tého zdroje nejistoty vlivu opěrné patky, hodnota byla stanovena na úrovni $\pm 3\%$ z naměřené hodnoty pro daný měřicí přístroj; k součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí, takže např. pro normální je $k = 2$, pro rovnoměrné $k = \sqrt{3}$.

Hodnota nejistoty měřicího přístroje u_{B2} byla stanovena na úrovni $\pm 3\%$ z naměřené hodnoty pro daný měřicí přístroj [9].

Příklad výpočtu nejistoty měření

- Standardní nejistoty typu B (u_B)
- Nejistota vlivu opěrné paty snímacího hrotu u_{B1}
- Nejistota měřicího přístroje u_{B2}

$$\begin{array}{lll} u_{B1} = \frac{\bar{x} \cdot 0,03}{k} & u_{B2} = \bar{x} \cdot 0,03 & u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} \\ u_{B1} = \frac{4,088 \cdot 0,03}{\sqrt{3}} & u_{B2} = 4,088 \cdot 0,03 & u_B = \sqrt{0,0708^2 + 0,1226^2} \\ u_{B1} = 0,0708 \text{ } [\mu m] & u_{B2} = 0,1226 \text{ } [\mu m] & \underline{\underline{u_B = 0,1416 \text{ } [\mu m]}} \end{array}$$

Kombinovaná standardní nejistota (u_c) je dána vztahem (9) [17].

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \text{ kde} \quad (9)$$

u_A standardní nejistota typu A;

u_B standardní nejistota typu B.

Příklad výpočtu nejistoty měření - kombinovaná standardní nejistota (u_C):

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

$$u_C = \sqrt{0,0681^2 + 0,1416^2}$$

$$\underline{\underline{u_C = 0,1571 \text{ } [\mu m]}}$$

Rozšířená kombinovaná nejistota U_C je dána vztahem (10) [17].

$$U_C = k_U \cdot u_C, \text{ kde} \quad (10)$$

u_c kombinovaná standardní nejistota;

k_u koeficient rozšíření (pokrytí), byl stanoven $k_u = 2$.

Pro rozdělení se koeficient rozšíření $k = 2$ odpovídá úrovni spolehlivosti přibližně 95%.

Příklad výpočtu nejistoty měření - rozšířená kombinovaná nejistota U_C

$$U_C = k_u \cdot u_c$$

$$U_C = 2 \cdot 0,1571$$

$$\underline{\underline{U_C = 0,3143 \text{ } [\mu m]}}$$

Pro zpracování a vyhodnocení výsledku byl použit software SJ-Tools, který je vytvořen na bázi programu Microsoft Office „Excel“, slouží i pro řízení přístroje a archivaci dat. Naměřená data jsou uvedena v tab. 15.

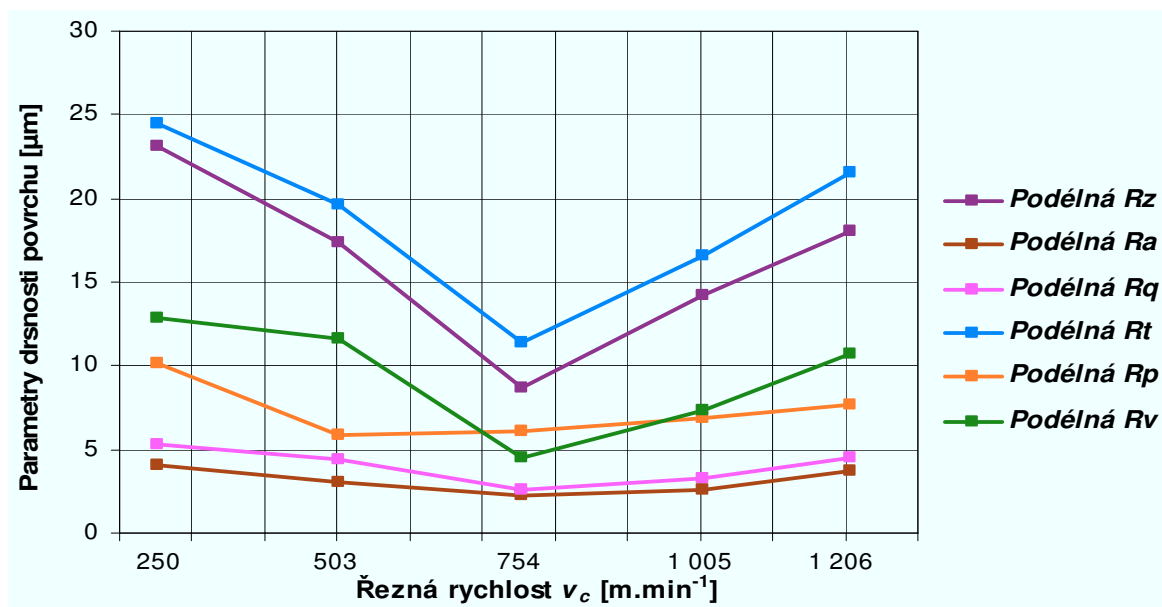
4.4 Vyhodnocení měření drsnosti povrchu

Při měření drsnosti povrchu v experimentu byly sledovány parametry drsnosti Ra a Rz , v podélném směru-osa x , a příčném směru-osa y . Parametr drsnosti Ra je střední aritmetická odchylka a je nejčastěji hodnotícím kritériem drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu v rozsahu základní délky. Druhým sledovaným parametrem drsnosti je Rz a je to nejvyšší výška nerovnosti profilu. Je to výšková charakteristika drsnosti povrchu, která je určena vzdáleností mezi čarou prohlubně profilu v rozsahu základní délky. V následujících tabulkách a grafem jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty sledovaných parametrů drsnosti povrchů pro materiál ocel 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128, a Bolzanova ocel ASP 2023 (ENHS 6-5-3) při použití 3 břitového nástroje. V příloze E jsou uvedeny v tabulkách a grafech naměřené a vypočtené hodnoty sledovaných parametrů drsnosti povrchu v příčném a podélném směru měření pro použité materiály při použití 4 břitového nástroje.

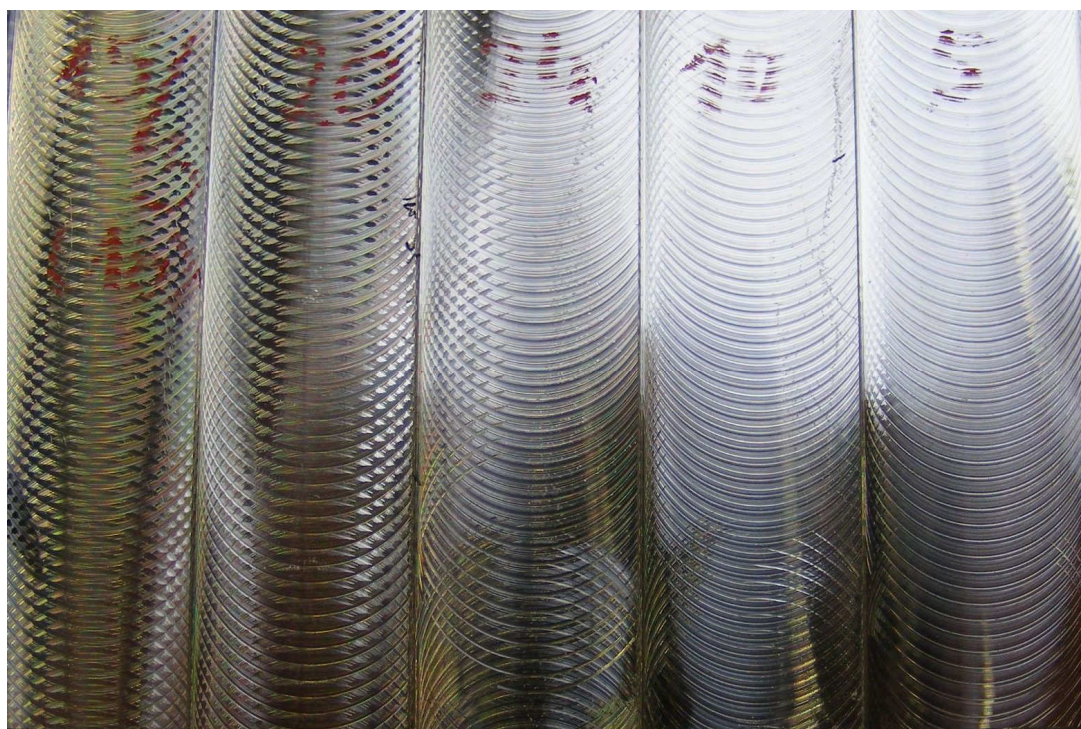
4.4.1 Hodnoty parametru drsnosti povrchu – 3 břitový nástroj, ocel 15 128, osa „x“

Tab. 16 Vypočtené průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu u 3 břitového nástroje, označení materiálu je ocel 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128 a měřené plochy jsou 28 až 32 ve směru osy „x“.

Plocha č.	Značení průměru naměřených hodnot \bar{x}	Měřené parametry drsnosti povrchu - podélné „osa x“					
		Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]
28	15-3-2A	4,09	23,10	5,33	24,47	10,13	12,90
29	15-3-3A	3,02	17,35	4,41	19,57	5,82	11,61
30	15-3-4A	2,27	8,73	2,62	11,36	6,04	4,49
31	15-3-5A	2,57	14,19	3,27	16,61	6,83	7,35
32	15-3-6A	3,73	18,07	4,55	21,55	7,64	10,74



Graf 1 Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu u 3 břitového nástroje, označení materiálu je ocel 15 128 a měřené plochy jsou 28 až 32 ve směru osy „x“.

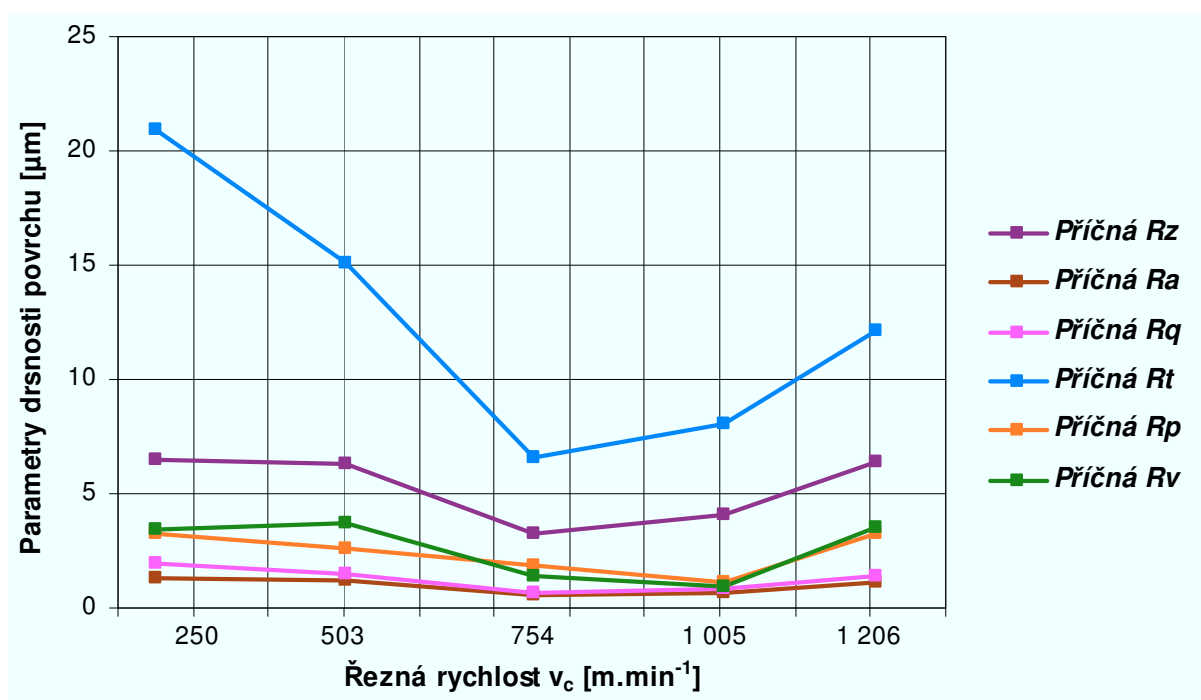


Obr. 16 Vzorek materiálu 15 128 po vysokorychlostním obrábění 3 břitové frézy

4.4.2 Hodnoty parametru drsnosti povrchu – 3 břitový nástroj, ocel 15 128, osa „y“

Tab. 17 Vypočtené průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu u 3 břitového nástroje, označení materiálu je ocel 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128 a měřené plochy jsou 28 až 32 ve směru osy „y“.

Plocha č.	Značení průměru naměřených hodnot \bar{x}	Měřené parametry drsnosti povrchu - příčné „osa y“					
		R_a [μm]	R_z [μm]	R_q [μm]	R_t [μm]	R_p [μm]	R_v [μm]
28	15-3-2B	1,29	6,47	1,91	20,89	3,21	3,45
29	15-3-3B	1,18	6,31	1,48	15,10	2,56	3,69
30	15-3-4B	0,54	3,27	0,69	6,61	1,84	1,43
31	15-3-5B	0,63	4,06	0,82	8,08	1,1	0,94
32	15-3-6B	1,10	6,36	1,42	12,11	3,21	3,49



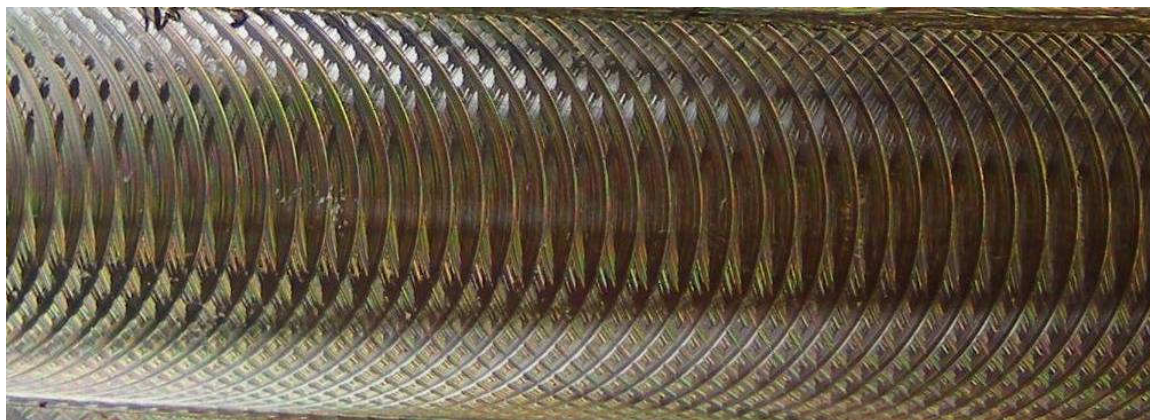
Graf 2 Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu u 3 břitového nástroje, označení materiálu je ocel 15 128 a měřené plochy jsou 28 až 32 ve směru osy „y“.

Z grafu a tabulek pro vzorek materiálu ocel 15 128 při použití 3 břité frézy, je vidět, klesající tendenci hodnot měřených parametrů drsnosti do řezné rychlosti v_c až 754 m.min⁻¹ a to jak pro podélnou tak i pro příčnou drsnost. Od řezné rychlosti $v_c = 754$ m.min⁻¹ hodnoty parametru drsnosti povrchu mají rostoucí tendenci.

Tab. 18 Vypočtené průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu u 3 břitového nástroje, označení materiálu je ocel 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128, řezná rychlost a rozšířená kombinovaná nejistota je uvedena u měřených ploch 28 až 32.

Plocha č.	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Parametr drsnosti R_a		Parametr drsnosti R_z	
		R_a ve směru x (podélná) [μm]	R_a ve směru y (příčná) [μm]	R_z ve směru x (podélná) [μm]	R_z ve směru y (příčná) [μm]
28	251,3	4,09 ± 0,31	1,29 ± 0,16	23,10 ± 1,63	6,47 ± 0,54
29	502,7	3,02 ± 0,25	1,18 ± 0,14	17,35 ± 1,23	6,31 ± 0,54
30	754,0	2,27 ± 0,23	0,54 ± 0,09	8,73 ± 0,89	3,27 ± 0,29
31	1005,3	2,57 ± 0,30	0,63 ± 0,12	14,19 ± 1,17	4,06 ± 0,43
32	1206,4	3,73 ± 0,32	1,10 ± 0,20	18,07 ± 1,33	6,36 ± 0,63

V tabulce vidíme rozšířené kombinované nejistoty u oceli 15 128, které se liší v podélném a příčném měření v závislosti na řezné rychlosti v_c [m.min⁻¹]. Z naměřených, vypočtených a grafických znázorněných hodnot vyplývá, že v příčném směru je drsnost R_a [μm] a R_z [μm] nižší než v podélném směru. Nejnižší naměřený a vypočtený parametr drsnosti je při řezné rychlosti $v_c = 754$ [m.min⁻¹], protože v příčném směru má nejnižší parametr drsnosti $R_a = 0,54 \pm 0,09$ [μm] a $R_z = 3,27 \pm 0,29$ [μm].

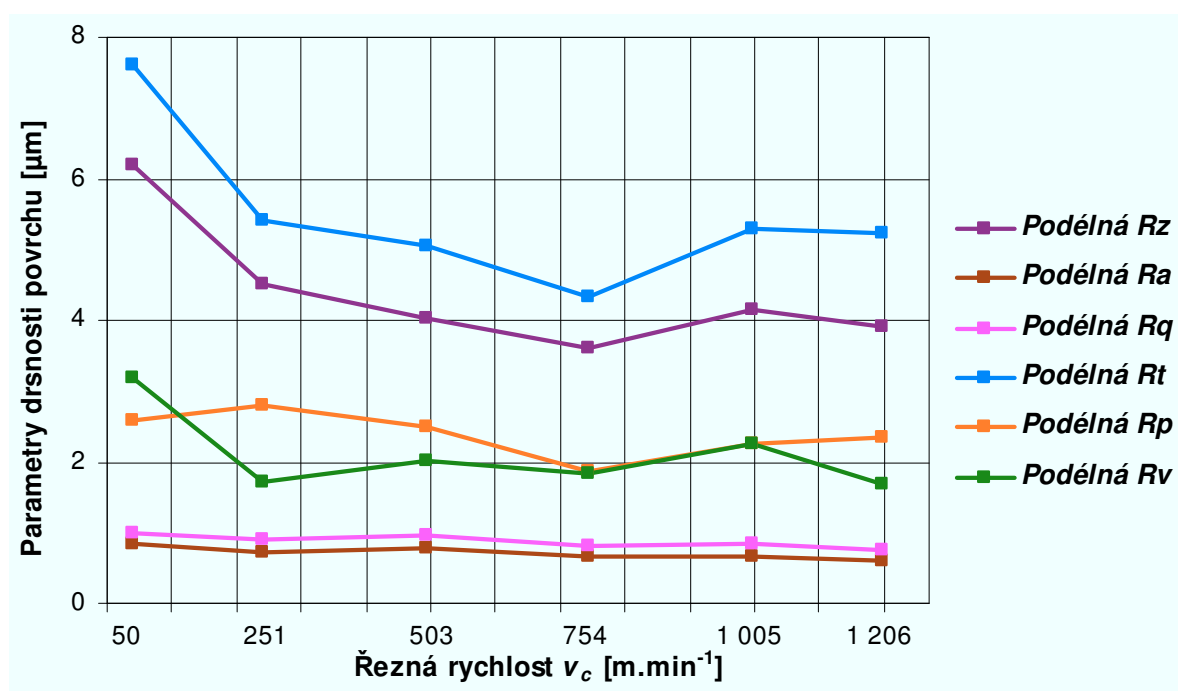


Obr.17 Detail obrobené plochy č. 28, ocel 15 128 a fréza typu F3AH1800ADL30

4.4.3 Hodnoty parametru drsnosti povrchu – 3 břitový nástroj, Bolzanova ocel ASP 2023 osa „x“

Tab. 19 Vypočtené průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu u 3 břitového nástroje, označení materiálu je Bolzanova ocel ASP 2023 a měřené plochy jsou 13 až 18 ve směru osy „x“.

Plocha č.	Značení průměru naměřených hodnot \bar{x}	Měřené parametry drsnosti povrchu - podélné „osa x“					
		Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]
18	19-3-1A	0,84	6,19	1,00	7,62	2,60	3,20
17	19-3-2A	0,72	4,52	0,90	5,40	2,80	1,71
16	19-3-3A	0,78	4,04	0,96	5,05	2,51	2,02
13	19-3-4A	0,65	3,61	0,82	4,34	1,87	1,83
14	19-3-5A	0,67	4,14	0,85	5,29	2,25	2,25
15	19-3-6A	0,61	3,90	0,75	5,24	2,34	1,68

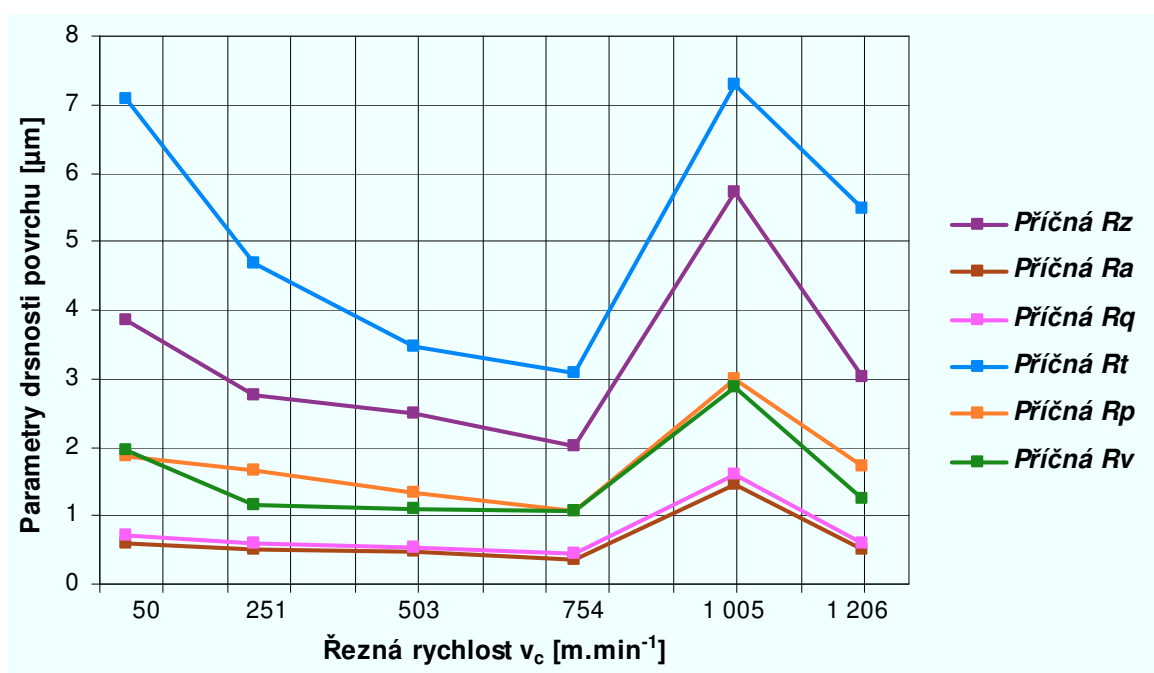


Graf 3 Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu u 3 břitového nástroje, označení materiálu je ocel Bolzanova ocel ASP 2023 a měřené plochy jsou 13 až 18 ve směru osy „x“.

4.4.4 Hodnoty parametru drsnosti povrchu – 3 břitový nástroj, Bolzanova ocel ASP 2023 osa „y“

Tab. 20 Vypočtené průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu u 3 břitového nástroje, označení materiálu je Bolzanova ocel ASP 2023 a měřené plochy jsou 13 až 18 ve směru osy „y“.

Plocha č.	Značení průměru naměřených hodnot \bar{x}	Měřené parametry drsnosti povrchu - příčné „osa y“					
		Ra [μm]	Rz [μm]	Rq [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]
18	19-3-1B	0,59	3,86	0,70	7,08	1,87	1,96
17	19-3-2B	0,49	2,76	0,60	4,68	1,65	1,17
16	19-3-3B	0,48	2,49	0,54	3,46	1,34	1,10
13	19-3-4B	0,37	2,02	0,44	3,09	1,08	1,08
14	19-3-5B	1,45	5,73	1,60	7,30	2,98	2,86
15	19-3-6B	0,50	3,03	0,59	5,47	1,72	1,25



Graf 4 Průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu u 3 břitového nástroje, označení materiálu je ocel Bolzanova ocel ASP 2023 a měřené plochy jsou 13 až 18 ve směru osy „y“.

Z výše uvedených tabulek a grafu pro vzorek materiálu Bolzanove oceli ASP 2023 při použití 3 břitů frézy je zřejmé, že hodnoty měřených parametrů drsnosti klesají od řezné rychlosti $v_c = 251$ do 754 m.min^{-1} , to jak pro drsnost podélnou tak i pro drsnost i pro příčnou.



Obr. 18 Vzorek materiálu ASP 2023 po vysokorychlostním obrábění

Tab. 21 Vypočtené průměrné hodnoty parametru drsnosti povrchu u 3 břitového nástroje, označení materiálu je Bolzanova ocel ASP 2023, řezná rychlost a rozšířená kombinovaná nejistota je uvedena u měřených ploch 13 až 18

Plocha č.	Řezná rychlost v_c [m.min ⁻¹]	Parametr drsnosti R_a		Parametr drsnosti R_z	
		R_a ve směru x (podélná) [μm]	R_a ve směru y (příčná) [μm]	R_z ve směru x (podélná) [μm]	R_z ve směru y (příčná) [μm]
18	50,3	0,84 ± 0,10	0,59 ± 0,08	6,19 ± 0,49	3,86 ± 0,32
17	251,3	0,72 ± 0,11	0,49 ± 0,06	4,52 ± 0,35	2,76 ± 0,30
16	502,7	0,78 ± 0,12	0,48 ± 0,06	4,04 ± 0,46	2,49 ± 0,24
13	754,0	0,65 ± 0,10	0,37 ± 0,12	3,61 ± 0,33	2,02 ± 0,26
14	1005,3	0,67 ± 0,12	1,45 ± 0,22	4,14 ± 0,42	5,73 ± 0,58
15	1206,4	0,61 ± 0,08	0,50 ± 0,10	3,90 ± 0,35	3,03 ± 0,39

V tabulce lze vidět rozšířené kombinované nejistoty u oceli ASP 2023, které se liší v podélném a příčném měření v závislosti na řezné rychlosti v_c [m.min⁻¹]. Z naměřených, vypočtených a grafických znázorněných hodnot vyplývá, že v příčném směru je drsnost R_a [μm] a R_z [μm] nižší než v podélném směru. Nejnižší naměřený a vypočtený parametr drsnosti je při řezné rychlosti $v_c = 754$ [m.min⁻¹], protože v příčném směru má nejnižší parametr drsnosti $R_a = 0,37 \pm 0,12$ [μm] a $R_z = 2,02 \pm 0,26$ [μm] .



Obr. 19 Detail obrobené plochy č. 18, ocel ASP 2023 fréza typu F3AH1800ADL30

5. ZHODNOCENÍ A SHRnutí PŘÍNOSŮ PRO PRAXI

Bakalářská práce se zabývá hodnocením drsnosti povrchu po vysokorychlostním obrábění. Předpokladem je, že při použití procesu vysokorychlostního obrábění, budou naměřené parametry drsnosti nižší při určité řezné rychlosti, než při opracování konvenčním obráběním.

Pro měření drsnosti povrchu obráběného materiálů byly použity dva vzorky oceli. Prvním vzorkem byla ocel 15 128 (13MoCrV6) ČSN 41 5128), druhým vzorkem oceli je Bolzanova ocel ASP 2023. K opracování těchto oceli byly použity tři frézy, které se liší v počtu břitů a průměru dané frézy.

Po opracování na stroji DMU 60 MonoBLOCK® byly vzorky oceli měřeny na přístroji drsnoměru Surftest SJ-401. Na drsnoměru Surftest SJ-401 byly naměřeny parametry drsnosti Ra , Rz , Rp , Rt a Rv . U vyhodnocení vzorku oceli byly však pouze zohledňovaný parametry Ra a Rz v podélném a příčném směru. Tedy průměrná aritmetická hodnota a nejvyšší výška nerovnosti profilu. Vypočtené a naměřené hodnoty byly zpracovány do tabulek a grafu, z kterých se potvrdil předpoklad, že při řezné rychlosti $v_c = 754 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ se parametr drsnosti se snižuje. Tento předpoklad se potvrdil u vybraného materiálu oceli Bolzanova ocel ASP 2023, ale i částečně u materiálu oceli 15 128.

Nejlepšího parametru drsnosti je dosahováno při rychlosti řezu $v_c = 754 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a parametru drsnosti $Ra = 0,37 \pm 0,12 \text{ } [\mu\text{m}]$ v příčném směru „osa y“ a $Rz = 2,02 \pm 0,26 \text{ } [\mu\text{m}]$ v příčném směru „osa y“ při použití 4 břitové frézy u vzorku materiálu Bolzanova ocel 2023.

Z ekonomického hlediska a zkrácení strojního času je pro nás výhodnější použití vyšších řezných rychlostí, dosažené parametry drsnosti se od menších řezných rychlostí liší.

Chyby mohly vzniknout při nepřesném měření, dále při nepřesnosti upínaného zařízení a dalšími faktory, které provázejí celý proces obrábění.

Efekt vysokorychlostního obrábění při hodnocení drsnosti se v tomto případě potvrdil, jak je možno z vypracovaných tabulek a grafu vidět, že při rostoucí rychlosti řezu klesá drsnost povrchu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠŤÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha : SNTL-nakladatelství technické literatury, 1989. 340 s.
- [2] ZELENÝ, J. *Vysokorychlostní obrábění*. MM průmyslové spektrum, 2000. ISSN 1212-2572.
- [3] SKOPEČEK, T.; VODIČKA, J. *Základy vysokorychlostního obrábění – HSC*. Plzeň : Vydavatelství Západočeské univerzity v Plzni, 2005. s. ISBN 80–7043–344–2.
- [4] *Suché frézování materiálu Ti6Al4V vysokými rychlostmi* [online] [cit. 2010- 11-30]
[URL:<http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialuti6al4v-vysokymi-rychlostmi>](http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialuti6al4v-vysokymi-rychlostmi).
- [5] *Důležité aspekty vysokorychlostního obrábění* [online] [cit. 2010-12-01]
[URL:<http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspektyvysokorychlostniho-obrabeni>](http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspektyvysokorychlostniho-obrabeni).
- [6] BRYCHTA, J. *Aspekty a efekty vysokorychlostního obrábění nepravidelných tvarů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – TU Ostrava, 2001. ISBN 978-80-248-1879-5.
- [7] DOSTÁL, Petr. *Integrita povrchu frézovaných tvarových ploch*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007.
- [8] ZEMAN, P.; ŠAFEK J.; VANĚČEK D. *Technologie HSC*. Fakulta strojní, ČVUT Praha, Web: <http://technik.ihned.cz>
- [9] NOVÁKOVÁ J. *Kreativní tvorba produktů ve vysokorychlostním obrábění: Disertační práce*, Ostrava : VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2010. s. 128.
- [10] Mitutoyo Česko s. r. o., Teplice, Česká republika. Drsnoměry měření jakosti povrchu [online]. 2006 [cit. 2009-01-15]. Dostupný z www: <http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/06_drsnomery.pdf>.
- [11] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie část 1*. Ostrava: VŠB-TUO Ostrava, 2006. s. 112 ISBN 80-248-0672-1
- [12] Technotools OHG, Haferwende, Germany. DMU 60 monoBlock® [online]. [cit. 2009-01-15]. Dostupný z www: <http://www.technotools.de/assets/images/DMU_60_monoBlock.gif>.

- [13] Kennametal Europe GmbH, Neuhausen am Rheinfall, Švýcarsko. Milling Tool Catalog 6050 – metric [online]. 2006 [cit. 2009-01-15]. s. 580. Dostupný z WWW:<
https://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/milling_metric_finalr.pdf >.
- [14] ERDL, BERT P. *High-speed machining*. Deaborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineering, 2003. ISBN 0-87263-649-6.
- [15] Fürbacher, I.; Macek, M.; Steidl, J. Lexikon technických materiálů 2.1. Praha: Verlag Dashöfer – nakladatelství, 2001. Dostupné z www: <<http://www.dashofer.cz>>.
- [16] ANGLETA, Luboš. *Hodnotenie drsnosti povrchu při obrábění ložiskovej ocele*. Žilina: Žilinská univerzita Žilina, 2005
- [17] Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. *AUTOMA – časopis pro automatizační techniku*, 2001, č. 7 - 8, s. 50-54. ISSN 1210-9592.
- [18] Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *AUTOMA – časopis pro automatizační techniku*, 2001, č. 10, s. 52-56. ISSN 1210-9592.
- [19] PRÁŠIL, T. *Základy strojírenské technologie*. [online]. [cit. 2010-05-5]. Dostupné na Word Wide Web:
http://www.semaco.cz/index.php?option=com_docman&task=catview&gid66&mosmsg=Zkou%C5%A1%C3%ADte+se+p%C5%99ipojit+z+neautorizovan%C3%A9+dom%C3%A9ny.+%28www.google.cz%2.
- [20] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s.126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [21] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [21] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [23] ČEP, R.; BRYCHTA, J., SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A	Technické parametry stroje DMU 60 monoBlock®
PŘÍLOHA B	Katalogová karta frézy F4AJ1800ADN3O
PŘÍLOHA C, D	Katalogový list frézy F3AH1600ADL30 a frézy F3AH1800ADL30
PŘÍLOHA E	Vypočtené hodnoty parametrů drsnosti povrchu a grafy

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat, vedoucí bakalářské práce Ing. et Ing. Mgr. Jana Petru, Ph.D. za trpělivost, cenné připomínky a rady při zpracování této bakalářské práce.